

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Nedestruktivní senzor pro detekci
nákladních automobilových vozidel v
nebezpečných prostředích**

**Non-destructive sensor for detection of
cargo automobile vehicles in dangerous
environments**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Miroslav Loch

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

**Nedestruktivní senzor pro detekci nákladních automobilových vozidel v
nebezpečných prostředích**
**Non-destructive sensor for detection of cargo automobile vehicles in
dangerous environments.**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Vláknově optické senzory jsou jednou z dynamicky se rozvíjejících oblastí fotoniky. Ta dnes, ale i s výhledem do budoucnosti, patří ke klíčovým technologiím. Vláknově optické senzory umožňují velmi citlivé snímání - odpadá nutnost implementace do vozovky nebo kolejiště, jsou plně pasivní z hlediska napájení elektrickou energií a imunní vůči elektromagnetickým interferencím.

Cílem studenta je zpracovat rešerši o využití optických a vláknově optických senzorů v oblasti dopravního provozu. V praktické části student sestojí prototyp vláknově optického senzoru na bázi Mach-Zehnderova interferometru a provede praktická měření detekce nákladních automobilových vozidel (vozidel nad 3,5t). Příklad užití výše uvedeného typu senzoru je například pro monitorování provozních aktivit nákladních vozidel v nebezpečných prostředích jako jsou doly, důlní vrty apod.

Zásady pro vypracování v bodech:

1. Zpracujte rešerši o využití optických a vláknově optických senzorů v oblasti dopravního provozu.
2. Sestavte prototyp optovláknového senzoru využívající standardní telekomunikační vlákna G.652.D na bázi Mach-Zehnderova interferometru s dělícím poměrem 1:1.
3. Proveďte měření frekvenčního rozsahu senzoru.
4. Proveďte praktická měření zaměřená na detekci nákladních vozidel, vyhodnoťte a statisticky zpracujte naměřená data.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 0471820539.
- [2] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. Field guide to interferometric optical testing. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Nedoma, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019

prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 26. dubna 2019

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized letters, likely 'F. D.', positioned above a dotted line.

.....

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Janu Nedomovi, Ph.D., za pomoc a konzultaci při vzniku této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou využitelnosti optovláknové technologie v dopravních aplikacích. Teoretická část práce je zaměřena na vysvětlení teoretických předpokladů a zpracování rešerše o aktuálním stavu techniky v silničním a železničním provozu. Na základě rešerše byl zvolen směr vývoje interferometrického senzoru pro detekci nákladních vozidel, respektive vozidel nad 3,5 tuny. Experimentální část popisuje konstrukci senzoru, specifikaci frekvenčního rozsahu, schéma měření a samotná praktická měření vozidel včetně statistického zpracování dat. Statistická analýza je založena na detekování celkem 443 vozidel s úspěšností 98,54%.

Klíčová slova: senzor, Mach-Zhender, diplomová práce, interferometr, detekce, nákladní vozidlo, nebezpečné prostředí

Abstract

Master thesis deals with the analysis of the use of fiber optic technology in transport applications. The theoretical part of the thesis is focused on the explanation of theoretical assumptions and processing of the research on the current state of the art in road and railway traffic. Based on the research, the direction of development of the interferometric sensor for the detection of trucks and vehicles over 3.5 tonnes was chosen. The experimental part describes the construction of the sensor, the specification of the frequency range, the measurement scheme and the practical measurements of the vehicles including the statistical data processing. Statistical analysis is based on the detection of a total of 443 vehicles with a success rate of 98.54%.

Key Words: sensor, Mach-Zhender, master thesis, interferometer, detection, cargo, vehicle, dangerous environments

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 9 |
| Seznam obrázků | 10 |
| Seznam tabulek | 12 |
| Úvod | 13 |
| 1 Světlo a jeho vlastnosti | 14 |
| 1.1 Šíření světla | 14 |
| 1.2 Polarizace světla | 15 |
| 1.3 Disperze světla | 16 |
| 1.4 Snellův zákon lomu | 16 |
| 1.5 Odraz světla | 17 |
| 1.6 Koherence záření | 18 |
| 1.7 Interference záření | 19 |
| 2 Optické vlákno | 21 |
| 2.1 Navázání světla do optického vlákna | 21 |
| 2.2 Optické vlákna SM | 22 |
| 2.3 Koherentní zdroje záření | 23 |
| 3 Optické vláknové senzory | 26 |
| 3.1 Interferometrické senzory | 26 |
| 4 Přehled dosavadního stavu techniky | 30 |
| 4.1 ITS (Inteligentní dopravní systémy) | 30 |
| 4.2 Rešerše v oblasti silničních vozidel | 31 |
| 4.3 Rešerše v oblasti železničních vozidel | 39 |
| 5 Úvod do praktické části | 44 |
| 5.1 Měření vibračně-akustické odezvy pomocí MZ interferometru | 44 |
| 5.2 Schéma senzoru s MZ interferometrem | 44 |
| 5.3 Použité optické prvky a měřící přístroje | 45 |
| 5.4 Softwarové zpracování signálu | 50 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | Konstrukce opticko-vláknového senzoru | 51 |
| 6.1 | Použité součásti a materiál | 51 |
| 6.2 | Postup konstrukce | 51 |
| 7 | Měření | 54 |
| 7.1 | Měření frekvenčního rozsahu senzoru | 54 |
| 7.2 | Praktické měření | 54 |
| 8 | Závěr | 60 |
| | Literatura | 61 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|-----------|---|
| λ | – Vlnová délka |
| m | – Metr |
| f | – Frekvence |
| Hz | – Hertz |
| V | – Volt |
| A | – Amper |
| \vec{E} | – Vektor intenzity elektrického pole |
| \vec{B} | – Vektor magnetické indukce |
| n | – Index lomu |
| c | – Rychlost světla |
| W | – Watt |
| dB | – Decibel |
| NA | – Numerická apertura |
| SM | – Jednovidové |
| MM | – Vícevidové |
| ITS | – Inteligentní dopravní systémy |
| CACS | – Comprehensive Automobile Traffic Control System |
| UTMS | – Universal Traffic Management System |
| CCTV | – Closed Circuit Television |
| SPZ | – Státní poznávací značka |
| RFID | – Radio Frequency Identification |
| FBG | – Fiber bragg grating |
| WIM | – Weight in motion |
| MZ | – Mach-Zhender |
| F-P | – Fabry-perot |
| LIDAR | – Light detection and ranging |
| DFB | – Distributed feedback laser |
| USB | – Universal serial bus |
| PC | – Osobní počítač |
| NI | – National instruments |
| km/h | – Kilometr za hodinu |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Viditelné spektrum | 14 |
| 1.2 | Elektromagnetická vlna | 15 |
| 1.3 | Disperze světla | 16 |
| 1.4 | Snellův zákon lomu | 17 |
| 1.5 | Částečný a úplný odraz světla | 18 |
| 1.6 | Příklad koherentního a nekoherentního záření | 18 |
| 1.7 | Interference světla | 20 |
| 2.1 | Rozdělení optických vláken dle šíření vln | 21 |
| 2.2 | Navázání světla do optického vlákna | 22 |
| 2.3 | Průřez SM vláknem | 23 |
| 2.4 | Absorpce a emise fotonu | 24 |
| 2.5 | Příklad inverze populace pomocí čtyř hladin | 24 |
| 2.6 | Závislost emitovaného výkonu na budícím proudu | 25 |
| 2.7 | Fabry-Perotův rezonátor | 25 |
| 3.1 | Sagnacův interferometr | 27 |
| 3.2 | Michelsonův interferometr | 27 |
| 3.3 | Fabry-perotův interferometr | 28 |
| 3.4 | Princip Mach-Zhenderova interferometru | 28 |
| 3.5 | Schéma vláknově optického MZ interferometru | 29 |
| 4.1 | Schéma konstrukce pneumatického senzoru | 31 |
| 4.2 | Schéma konstrukce indukčního senzoru | 32 |
| 4.3 | Detekce pomocí CCTV[28] | 33 |
| 4.4 | Princip mikrohybového senzoru | 34 |
| 4.5 | Základní schéma senzoru a uložení ramen interferometru [38] | 35 |
| 4.6 | Schéma vláknově optického senzoru s F-P interferometrem | 36 |
| 4.7 | Schéma detekčního systému ze spisu[44] | 37 |
| 4.8 | Schéma senzoru z užitého vzoru[45] | 38 |
| 4.9 | Schéma zapojení senzoru z patentového listu[46] | 38 |
| 4.10 | Princip kolejového obvodu | 40 |
| 4.11 | Snímání profilu soupravy pomocí LIDAR, převzato z [49] | 41 |
| 4.12 | Způsoby upevnění FBG senzorů na kolejnici[65] | 42 |
| 4.13 | Schéma zapojení interferometrického senzoru a implementace na kolejnici | 43 |
| 5.1 | Schéma měřicí soustavy | 45 |
| 5.2 | Použité měřicí schéma pro detekci vozidel nad 3,5 tuny | 45 |
| 5.3 | Rezonátor DFB laseru | 46 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.4 | Faradayova rotace | 47 |
| 5.5 | Vazební člen[56] | 48 |
| 5.6 | Použitý fotodetektor | 49 |
| 5.7 | Měřicí karta NI myDAQ | 49 |
| 5.8 | Monitorovací aplikace | 50 |
| 6.1 | Malpro S-BOX 716 | 51 |
| 6.2 | Průchodka EG-11BL | 51 |
| 6.3 | Průběh konstrukce | 52 |
| 6.4 | Sestavený senzor | 53 |
| 7.1 | Schéma pro měření frekvenčního rozsahu senzoru | 54 |
| 7.2 | Měřicí stanoviště Svinov mosty | 55 |
| 7.3 | Průběh měření - koláž vybraných fotografií průjezdů | 56 |
| 7.4 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího autobusu v časovém spektru | 57 |
| 7.5 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího autobusu ve frekvenčním spektru | 57 |
| 7.6 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího kamionu v časovém spektru | 57 |
| 7.7 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího kamionu ve frekvenčním spektru | 58 |
| 7.8 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího krátkého nákladního vozidla v časovém spektru | 58 |
| 7.9 | Vibračně-akustická odezva projíždějícího krátkého nákladního vozidla ve frekvenčním spektru | 58 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Shrnutí vláknově optických technologií využívaných v silniční dopravě | 39 |
| 7.1 | Výsledky měření v reálném provozu | 59 |

Úvod

Aktuální problematikou v rámci dopravního provozu je tzv. koncepce SMART cities, které zahrnují myšlenku chytrých a současně jednoduchých senzorů. Jako vhodný adept se zde jeví optovláknová technologie. Důvodů je několik, mezi základní lze zařadit jednoduchá konstrukce, odolnosti vůči elektromagnetickému rušení, vysoká citlivost, možnost vzdáleného vyhodnocení informace, oddělení místa měření od místa zpracování dat apod. Pomocí těchto senzorů můžeme analyzovat mnoho dopravních faktorů jako například typ vozidla, rychlost vozidla, hmotnost vozidla, detekovat průjezd vozidla, počet náprav, detekovat řazení vozidla do jiného pruhu či směru jízdy, hustotu provozu a další parametry. V rámci této diplomové práce byl vytvořen senzor na bázi nejjednoduššího zapojení a to dvouramenného jednovidového Mach-Zhenderova interferometru, který lze využít pro detekci průjezdu automobilových vozidel nad 3,5 tuny. Vzhledem k výše uvedeným výhodám lze takovýto typ senzoru využít pro detekci vozidel v nebezpečných prostředích jako jsou hluboké tunely či důlní šachty.

Diplomová práce sestává z teoretické a praktické části. Teoretická část je zaměřena na základní popis a vysvětlení definice světla, jeho šíření v optických vláknech, optických vláken a vláknově optických senzorů. V teoretické části je také zpracována rešerše o aktuálně používaných technologiích s primárním zaměřením na vláknově optické senzory v dopravním provozu. Na základě rešerše byl zvolen směr vývoje interferometrického senzoru.

Experimentální část popisuje konstrukci senzoru, specifikaci frekvenčního rozsahu, schéma měření a popis jednotlivých prvků. Specifikován je dále použitý software pro detekování vozidel. Praktická část práce dále obsahuje popis měření vozidel včetně statistického zpracování dat, které je založeno na detekování celkem 443 vozidel s úspěšností 98,54%. Viditelné maxima ve frekvenčním spektru ve frekvenčním rozsahu 75-95 Hz jsou typickým projevem dynamických efektů v důsledku těžké kamionové dopravy, což odpovídá rozsahům uvedeným v ISO 4866: 2010.

1 Světlo a jeho vlastnosti

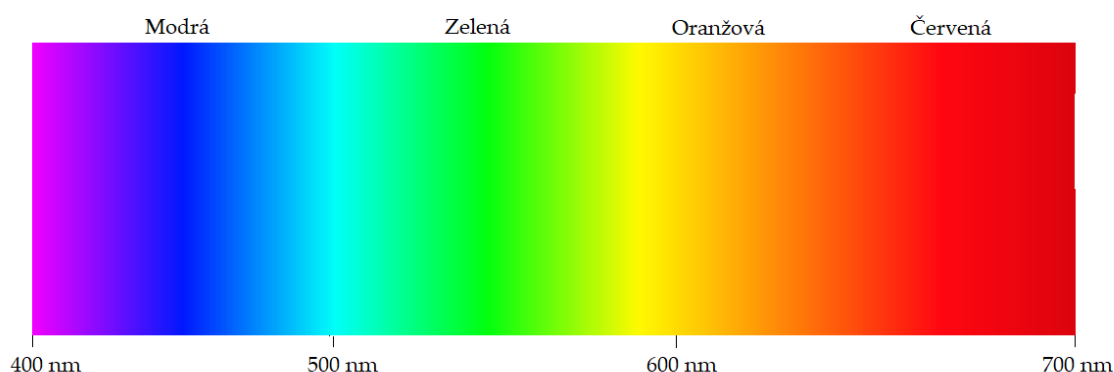
Světlo je obecně druh elektromagnetického záření. Toto záření je charakterizováno rychlostí, vlnovou délkou a specifickými vlastnostmi. Světlo k šíření nepotřebuje látkové prostředí, tudíž se může šířit ve vakuu. Rychlost světla při šíření ve vakuu:

$$c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$$

Ve vakuu se světlo šíří nejrychleji. Jeho rychlost je ovlivněna prostředím a frekvencí. Vlnová délka udává délku vlny v metrech a lze spočítat pomocí vzorce:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla v daném prostředí a f je frekvence. Světlo o různých frekvencích či vlnových délkách lidské oko vnímá jako odlišné barvy. Viditelné spektrum se nachází na vlnových délkách od cca 400 nm do cca 700 nm.



Obrázek 1.1: Viditelné spektrum

Světlo můžeme dělit na monochromatické a polychromatické. Monochromatické světlo obsahuje jen jednu vlnovou délku a jeho zdroj je například laserová dioda. Polychromatické tzv. vícebarevné světlo je složeno z více vlnových délek a jako zdroj lze uvést například žárovka.[1]

1.1 Šíření světla

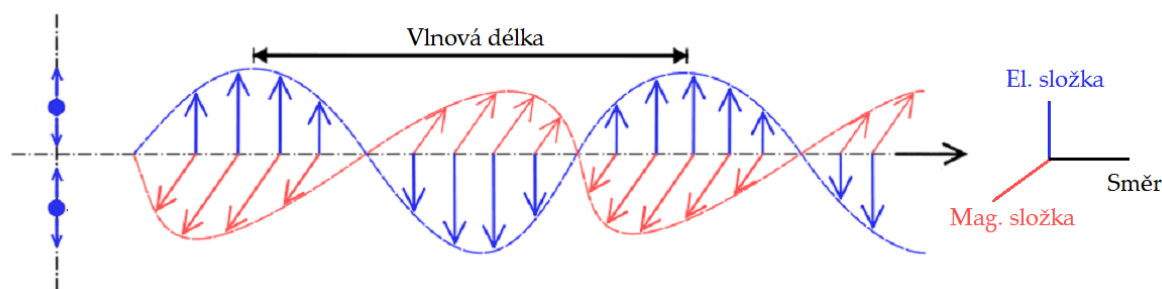
Světlo se šíří podle Fermatova principu. Znamená to, že volí při své cestě takovou dráhu, aby mu cesta ze zdroje k cíli zabrala co nejmenší čas. Při průchodu světla prostředím je světlo ovlivňováno vlastnostmi daného prostředí. Může dojít k následujícím jevům:

- Průchod světla
- Absorbce světla
- Rozptyl světla
- Odraz světla

Při obyčejném průchodu světla nenastává žádná změna. Při absorpci světla dochází ke snížení intenzity záření. Při rozptylu se světlo rozptýlí i do jiných směrů, než byl původní směr šíření a při odrazu se světlo odráží od daného prostředí.

1.2 Polarizace světla

Jelikož světlo je elektromagnetické vlnění, skládá se ze dvou složek. Elektrické složky, která reprezentuje vektor intenzity elektrického pole \vec{E} , a dále z magnetické složky, která představuje vektor magnetické indukce \vec{B} . Tyto složky jsou navzájem kolmé a jsou kolmé i směr šíření světla.



Obrázek 1.2: Elektromagnetická vlna

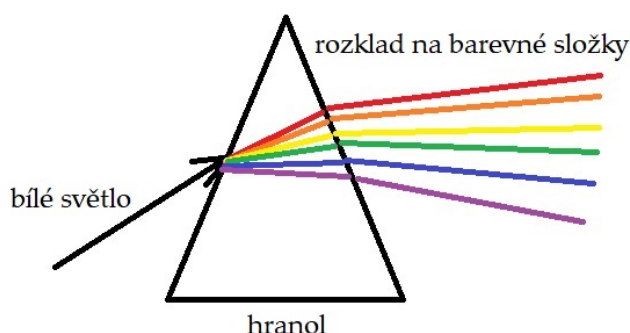
Vektor \vec{E} má ale v dané rovině nahodilou velikost i směr, a proto se zde jedná o nepolarizované světlo. Pokud omezíme směr kmitání vektoru \vec{E} , a vektor tak kmitá pouze v přesně určené kmitové rovině, získáme lineárně polarizované světlo. Tento rozdíl mezi světlem polarizovaným a světlem nepolarizovaným nelze rozpoznat lidským okem. Lineárně polarizované světlo lze získat několika způsoby:

- odrazem
- lomem
- dvojlomem
- polaroidem

[2][3]

1.3 Disperze světla

Disperze světla je fyzikální jev, při kterém dochází k rozkladu šířícího se světla na jednotlivé barevné složky. Disperze je důsledkem závislosti rychlosti světla na jeho frekvenci. Pokud bílé světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí, láme se a vstupuje do prostředí druhého, tak lomené světlo již není bílé, ale má zbarvené okraje. Jinými slovy se při lomu rozloží na barevné složky.[4][5]



Obrázek 1.3: Disperze světla

1.4 Snellův zákon lomu

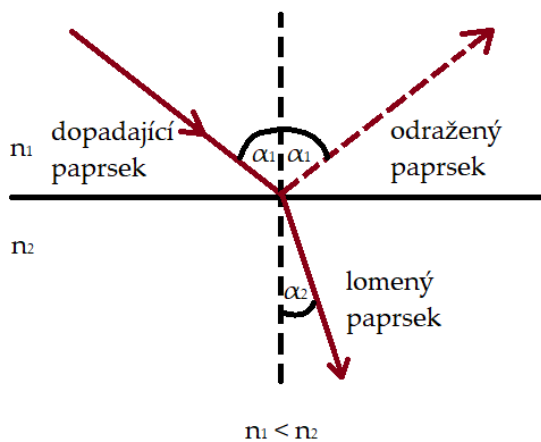
Snellův zákon lomu je vzorec popisující vztah mezi úhly dopadu a lomu při přechodu světla z jednoho prostředí do druhého, např. přechod voda/vzduch nebo vzduch/sklo. Říká, že poměr sinů úhlů dopadu a lomu je ekvivalentní poměr fázové rychlosti v obou médiích, nebo ekvivalentní převrácená hodnota poměru indexů lomu. Index lomu je bezrozměrný parametr, který popisuje, jak se světlo šíří daným prostředím. Značí se n a vypočítá se podle vztahu,

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, v je rychlost světla v prostředí. Samotný vzorec Snellova zákona lomu je dán:

$$\sin(\alpha_1) \times n_1 = \sin(\alpha_2) \times n_2 \quad (1.3)$$

[6]

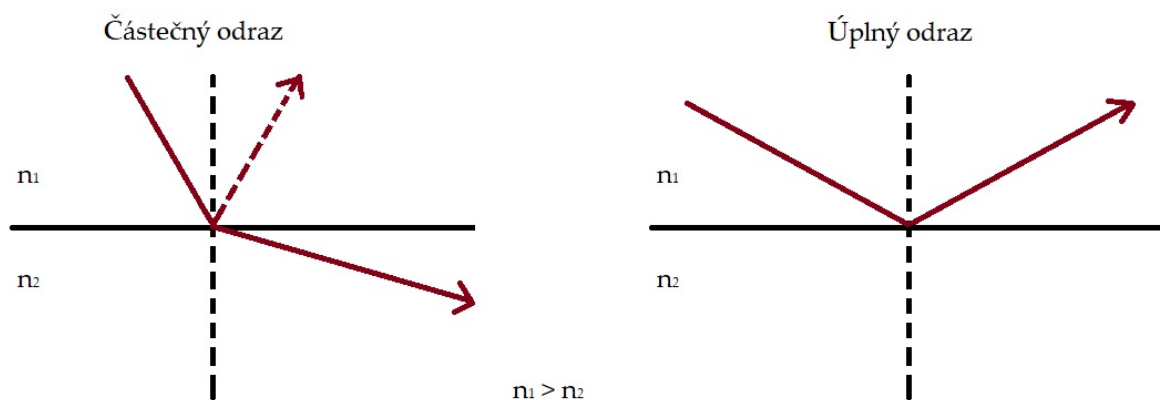


Obrázek 1.4: Snellův zákon lomu

1.5 Odraz světla

K odrazu světla dochází na rozhraní dvou prostředí při přechodu světla z jednoho prostředí do druhého. Pokud světlo dopadá na rozhraní pod úhlem menším než je mezní úhel dopadu, část světla prochází do druhého prostředí a část se odráží zpět. Tento odraz se nazývá částečný odraz. Při dopadu světla pod úhlem vyšším, než mezní úhel dopadu, dochází k úplnému odrazu. Platí zde vztah, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu, přitom odražený paprsek zůstává v rovině dopadu, určenou dopadajícím paprskem a kolmicí. Vzorec mezního úhlu dopadu je znázorněn v rovnici.[6]

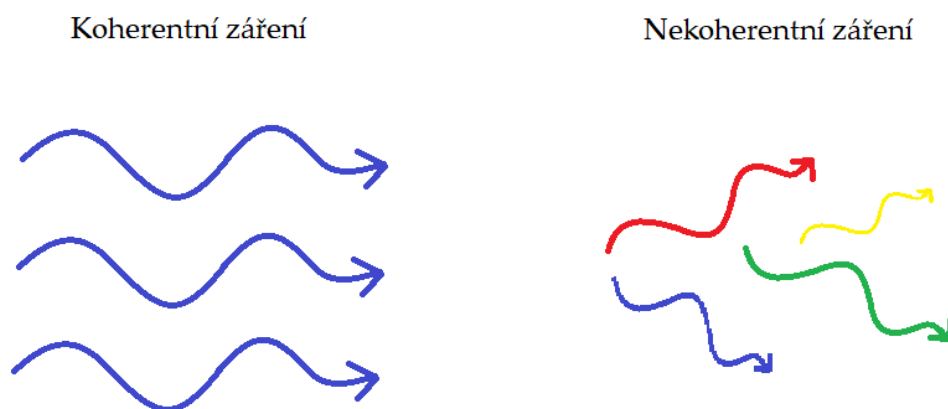
$$\sin(a_m) = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$



Obrázek 1.5: Částečný a úplný odraz světla

1.6 Koherence záření

Jeden z důležitých parametrů zdrojů záření využívaných v optoelektronice je tzv. koherence záření. Koherentní zdroje záření jsou takové, jejichž frekvence záření je stále stejná a nemění se rozdíl fází vyzařovaných paprsků. Koherenci lze dělit na časovou a prostorovou. Zvýšením monochromatickosti záření kladně ovlivňujeme koherenci časovou a ohraničením zářící plochy zdroje kladně ovlivňujeme koherenci prostorovou. Tímto získáme lepší koherenční vlastnosti. [7]



Obrázek 1.6: Příklad koherentního a nekoherentního záření

1.6.1 Časová koherence

Pokud je generováno záření s konečnou šířkou spektrální čáry a vlnová délka takového záření leží v intervalu $\lambda + \Delta\lambda$, bude docházet při interferenci paprsků o vlnové délce λ s paprsky o vlnové délce $\lambda + \Delta\lambda$ ve směru šíření záření k záznějům. Vzdálenost těchto záznějů lze nazývat koherenční délkou L , vyjadřující schopnost zdroje generovat stacionární záření se stálou fází ve sledovaném bodě.

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f} \quad (1.5)$$

[7]

1.6.2 Prostorová koherence

Prostorovou koherenci můžeme vyjadřovat pomocí tzv. koherenční šířky. Koherenční šířka je vzdálenost mezi osou svazku a místem, ve kterém dostaneme minimální intenzitu při interferenci paprsků šířících se od okraje monochromatického plošného zdroje. [7]

1.7 Interference záření

Jev, ke kterému dochází při setkání dvou a více vlnění. Tyto vlny se navzájem ovlivňují. Pro zjednodušení budeme počítat pouze se dvěma vlnami o stejné vlnové délce, intenzitě, fázi a rychlosti šíření s tím, že počátek vlnění má jinou polohu.

Vztahy pro popis vzhledem k bodu M vypadají takto:

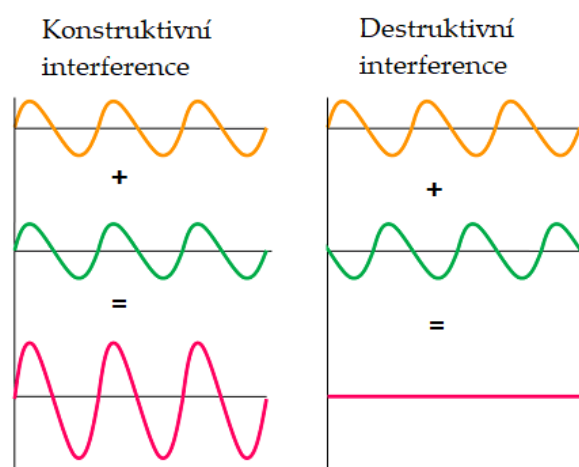
$$y_1 = y_m * \sin(2 * \pi) \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) \quad (1.6)$$

$$y_2 = y_m * \sin(2 * \pi) \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \quad (1.7)$$

Fázový rozdíl lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) \quad (1.8)$$

Interference se dá dělit na konstruktivní a destruktivní interferenci. Konstruktivní interference nastává, pokud bude dráhový rozdíl roven sudému násobku půlvln ($\lambda/2$). Destruktivní interference nastane, pokud dráhový rozdíl bude roven lichému násobku půlvln. [8]

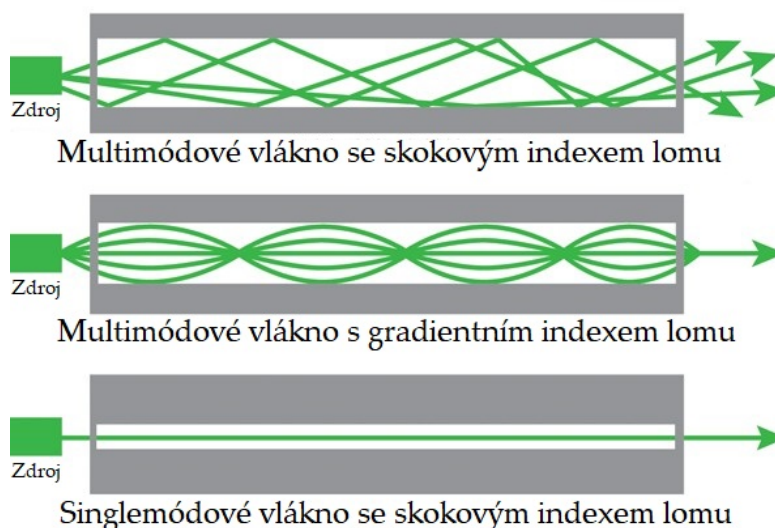


Obrázek 1.7: Interference světla

2 Optické vlákno

Optická vlákna se využívají v optoelektronice a ve sdělovací technice. Základem vlákna je jádro, vyrobené ze směsi křemenného a germaniového skla GeO_2 . Přenos ve vlákne funguje na principu úplného odrazu světla. Aby jádro bylo funkční, musí být index lomu jádra vyšší, než index lomu pláště. Světlo se tedy na rozhraní jádra a pláště odráží a šíří se po trajektorii, kterou udává tvar vlákna. Existují tři základní druhy vláken, používané v informačních sítích.[9][10]

- Single Mode vlákna (jednovídné)
- Multi Mode Step Index vlákna (mnohavídné se skokovou změnou indexu lomu)
- Multi Mode Gradient Index vlákna (mnohavídné s gradientní změnou indexu lomu)



Obrázek 2.1: Rozdělení optických vláken dle šíření vln

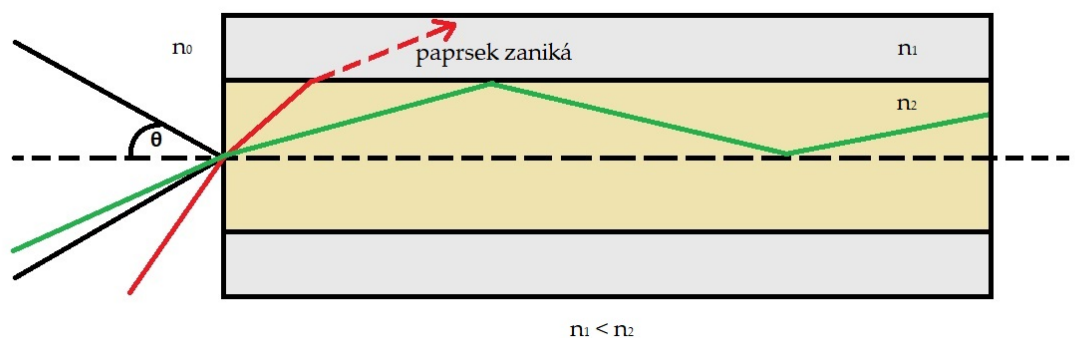
2.1 Navázání světla do optického vlákna

Pro navázání světla do optického vlákna je důležitý jeden z jeho parametrů - NA (numerická apertura). Tento parametr nám udává rozsah úhlů, pod kterými se světlo navázané do vlákna může vláknem šířit.

Vztah pro numerickou aperturu je vyjádřen takto.

$$NA = n_0 \times \sin\Theta = n_1^2 - n_2^2 \quad (2.1)$$

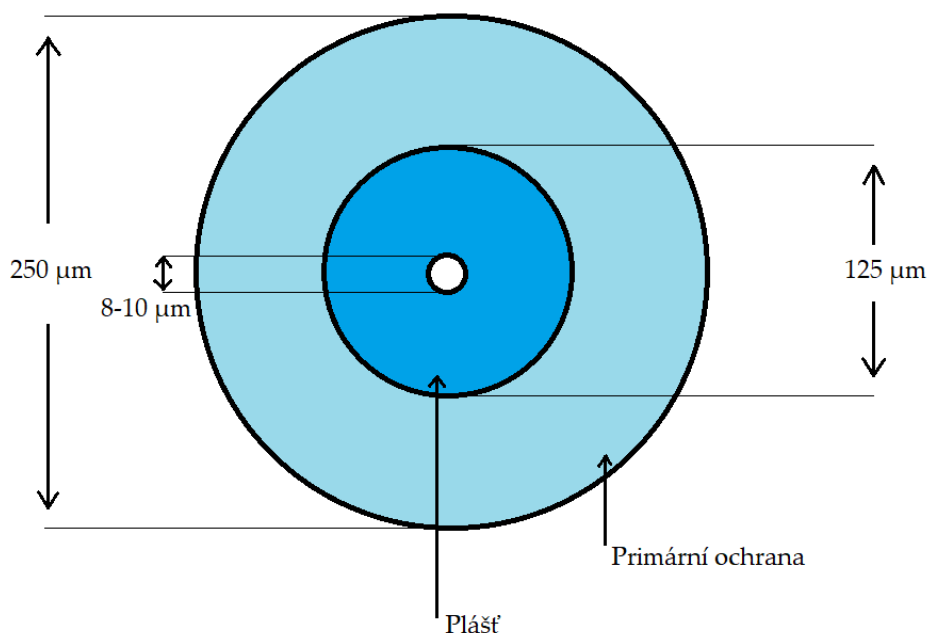
n je index lomu světla prostředí, ze kterého se světlo navazuje. Theta je maximální úhel navázání světla. n_1 a n_2 jsou indexy lomu jádra a pláště. Princip navázání světla do optického vlákna je znázorněn na obrázku níže.[11]



Obrázek 2.2: Navázání světla do optického vlákna

2.2 Optické vlákna SM

Jednovidová vlákna mají menší průměr jádra oproti mnohavidovým vláknům ($9\mu\text{m}$). Protože přenáší jen jeden vid, nedochází k vidové disperzi a vzniká nižší útlum. Jednovidová vlákna se proto používají k přenosu na větší vzdálenosti.[12]



Obrázek 2.3: Průřez SM vláknem

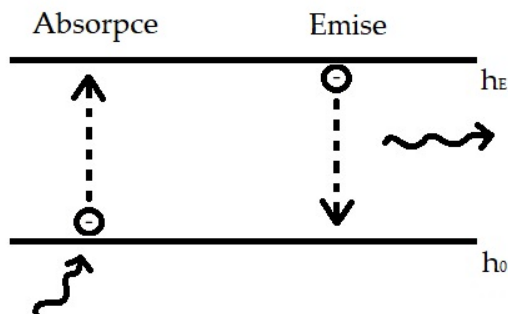
2.3 Koherentní zdroje záření

Koherentní zdroje záření emitují koherentní monochromatické světlo. Takový zdroj je např. laserová dioda. Díky tomuto prvku došlo v velkém technologickém pokroku v optoelektronice. Laserová dioda využívá stimulované emise. Základní podmínky pro funkci laserové diody jsou zmíněny níže a popsány v dalších podkapitolách.[13]

- Inverze populace
- Překročení prahového budícího proudu
- Použití rezonátoru

2.3.1 Inverze populace

Nejprve je potřeba ujasnit pojmy absorpce a emise světla. Elektrony v materiálu se v důsledku pohlcení nebo-li absorpce energie dostávají do vyšší energetické, tzv. excitační hladiny. K tomuto dochází pouze, pokud platí, že $E = h \times \nu = \Delta E_H$, kde E je absorbovaná energie a E_H je rozdíl energie mezi hladinami. Poté elektron padá zpět do nižší energetické hladiny. Při tomto spádu emituje foton.[13][14]



Obrázek 2.4: Absorpce a emise fotonu

Inverze populace je stav, kdy je ve vyšším energetickém stavu více elektronů, než v nižším energetickém stavu. S využitím dvou energetických hladin nelze dosáhnout inverze populace. Využíváme k tomu tři a více energetických hladin. Důležitá je metastabilní hladina, což je hladina, ve které elektron setrvává určitou dobu a až poté padá do nižší energetické hladiny. Na obrázku vidíme příklad inverze populace mezi hladinou h_3 a h_2 . [13][14]

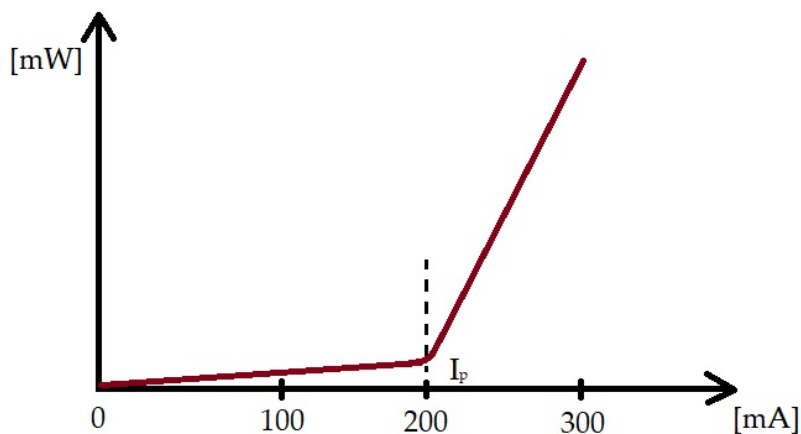


Obrázek 2.5: Příklad inverze populace pomocí čtyř hladin

2.3.2 Překročení prahového budícího proudu

Pro vybuzení stimulované emise je také potřeba překročit hranici prahového budícího proudu. Do chvíle překročení vzniká spontánní emise, od překročení hranice již vzniká stimulovaná emise

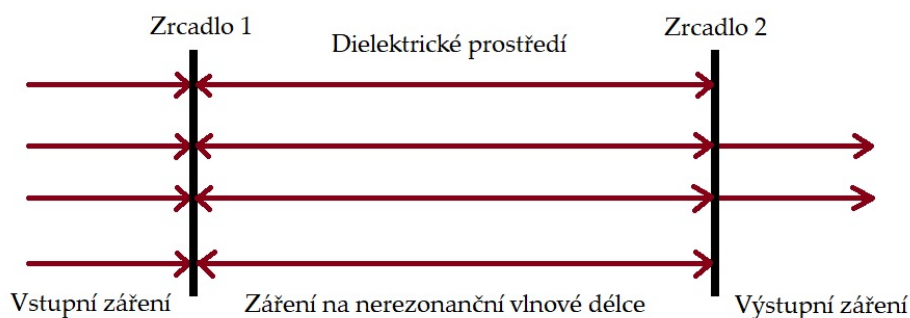
a prudce narůstá výkon stimulovaného záření.[13]



Obrázek 2.6: Závislost emitovaného výkonu na budícím proudu

2.3.3 Použití rezonátoru

Optický rezonátor je dutina s pasivním dielektrickým prostředím, po stranách obklopená odrazovými plochami. Díky vysokému rozdílu indexů lomu tyto plochy fungují jako zrcadla. Nejběžnější a nejjednodušší příklad rezonátoru u polovodičových laserových diod je soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel obdélníkového tvaru v určité vzdálenosti. Takové soustavě se říká Fabry-Perotův rezonátor.[13]



Obrázek 2.7: Fabry-Perotův rezonátor

3 Optické vláknové senzory

Obecně opticko-vláknové senzory a systémy vycházejí z optických komunikací. Rozdíl je v tom, že zatímco v oboru optických komunikací chceme docílit toho, aby vlna světelného záření byla po celé délce trasy co nejméně ovlivněna okolními vlivy, tak v případě vláknově optických senzorů chceme, aby byla vlna světelného záření v sensorickém systému co nejvíce ovlivněna námi zvolenou měřenou veličinou. Porovnáním optického vstupu a optického výstupu zjistíme, jak moc byla vedená vlna ovlivněna měřenou veličinou a poté lze určit velikost měřené veličiny.

Optické senzory nabízejí mnoho výhod, jako např. malé rozměry, vysoká citlivost na měřenou veličinu, nízká hmotnost, velká šířka pásma atd. Mezi hlavní nevýhody spadá vysoká citlivost i na ostatní veličiny ovlivňující vlnu, tudíž na výstupu existuje velké zatížení chybou. U novějších typů senzorů by to mohla být cena. Dle modulace měřené veličiny můžeme senzory dělit na

- Intenzitní (Amplitudové) senzory
- Interferometrické (Fázové) senzory
- Polarimetrické (Polarizační) senzory
- Spektroskopické (Frekvenční) senzory

[15]

3.1 Interferometrické senzory

Interferometrické senzory porovnávají rozdíl fáze vln, jež uběhly stejnou dráhu. K tomu je využíván jev, zvaný interference záření (kapitola 1.7). Pro konstrukci takového senzoru je obecně potřeba kvalitní laserový zdroj a singlemódová vlákna.

Vztah pro výpočet fáze vlny:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi Ln}{\lambda} \quad (3.1)$$

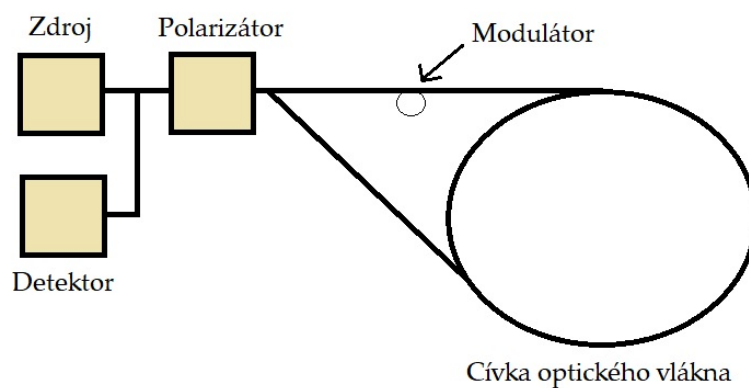
Interferometry lze dále dělit dle konstrukce do tří základních skupin:

- Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou
- Dvojramenný jednomódový interferometr
- Mezimódový interferometr

[15][16]

3.1.1 Jednovláknový interferometr

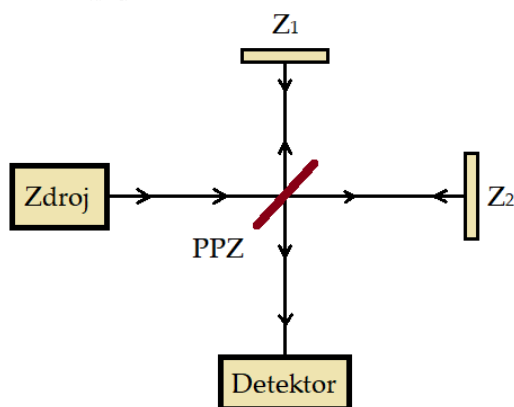
Jako příklad jednovláknového interferometru lze použít Sagnacův interferometr, který porovnává fázi dvou optických vln, šířící se proti sobě v cívce optického vlákna. [15][16]



Obrázek 3.1: Sagnacův interferometr

3.1.2 Dvojramenný interferometr

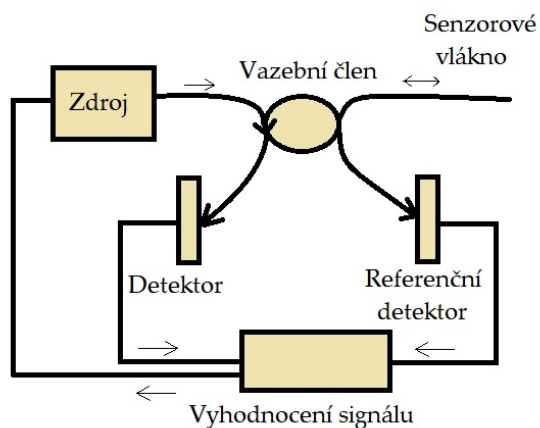
Tento interferometr porovnává fáze světelné vlny šířící se senzorickým optickým vláknem a referenčním vláknem. Jako příklady dvojramenného interferometru lze uvést Mach-Zehnderův interferometr nebo Michelsonův interferometr.[15][16]



Obrázek 3.2: Michelsonův interferometr

3.1.3 Mezimódový interferometr

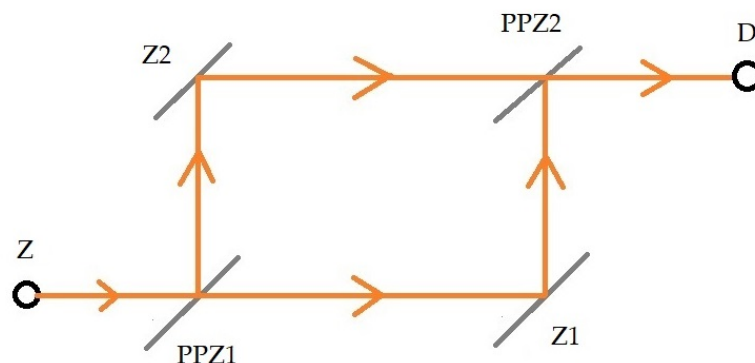
Mezimódový interferometr porovnává rozdíl fáze vln dvou, nebo více vidů světelné vlny ve stejném optickém vlákně. Výhodou je možnost použití vícemódových optických vláken. Nevýhodou je složité vyhodnocování interferenčního obrazce. Jako příklad lze uvést Fabry-perotův interferometr. [15][16]



Obrázek 3.3: Fabry-perotův interferometr

3.1.4 Mach-Zehnderův interferometr

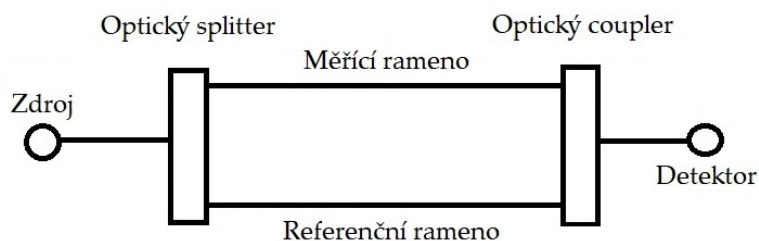
Dvojamenný interferometr, porovnávající změny fáze mezi dvěma světelnými paprsky. I přesto, že byl vynalezen před více než sto lety, je dodnes používán k mnoha optickým měřením. Principiálně funguje tento interferometr takto.



Obrázek 3.4: Princip Mach-Zehnderova interferometru

Světelný paprsek vyzářený koherentním zdrojem záření Z se částečně odrazí od polopropustného zrcadla PPZ1 směrem k zrcadlu Z2, částečně projde skrz směrem k zrcadlu Z1. Paprsky se opět scházejí na polopropustném zrcadle PPZ2 a jdou dále do detektoru. Na detektoru lze pozorovat rozdíl fází těchto dvou vln. V závislosti na tomto fázovém rozdílu dostaneme na výstupu interferometru interferenční obrazec.

Interferometr nemusí být vždy reprezentován systémem zrcadel. Vláknově optický Mach-Zhenderův interferometr využívá dvou jednovidových optických vláken, optického děliče a vazebního členu. Takto řešený interferometr lze využít jako čidlo pro měření nebo detekci různých vlivů, například tlaku nebo teploty. Schéma je zobrazeno na obrázku 3.2.



Obrázek 3.5: Schéma vláknově optického MZ interferometru

Světlo ze zdroje rovnoměrně rozděljuje optický dělič do dvou ramen jednovidových optických vláken. V obou vláknech klesne výkon o 3dB, to znamená, že se ramenem šíří polovina vstupního výkonu. Paprsky se opět spojí v optickém coupleru, kde dochází ke skládání vln z obou ramen. Následovně je světlo snímáno detektorem a dále vyhodnocováno. Libovolný externí zásah by mohl ovlivnit světlo šířící se rameny interferometru a tím změnit rozdíl fází mezi rameny. To může mít za následek vyšší chybovost měření.[17][18]

4 Přehled dosavadního stavu techniky

V této části je splněn bod zadání o provedení rešerše o použití optických a vláknově optických senzorů v dopravě. Jsou zde shrnuty stávající technologie a senzory v silničním a vlakovém provozu. Rešeršní hledání jsou vždy rozdělena do tří podskupin (konvenční senzory, optické a vláknově optické senzory, interferometrické senzory). Celá rešerše se zaměřuje na ITS (intelligentní dopravní systémy), které dnes představují trend a spojují informační a komunikační technologie s dopravními sítěmi.

4.1 ITS (Intelligentní dopravní systémy)

Počátkem ITS byl projekt CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System), který měl za úkol dynamicky řídit silniční dopravu a provoz. Automobily komunikovaly prostřednictvím silničních jednotek (antény zabudovány v povrchu vozovky) s centrální počítačovou řídicí jednotkou, která zpracovává a koordinuje shromážděné informace. Tento projekt vznikl roku 1973 v Japonsku, kde byl úspěšně testován.[19]

Dalším významným projektem byl například UTMS (Universal Traffic Management System), zahrnující pokročilý mobilní informační systém, integrovaný systém řízení dopravy, systém priorit veřejné dopravy, dynamický systém navádění na cesty, systém řízení mobilních operací a systém řízení ochrany životního prostředí.[20]

Dnes ITS představují spojení dopravních sítí s informačními a komunikačními technologiemi. Díky výzkumu a zdokonalování stavu techniky se tyto různě dokonalé systémy rozšířily a uplatnily po celém světě. Jejich hlavním účelem je zvýšit plynulost dopravy optimalizací dopravních toků a zvýšit tak plynulost provozu a vliv na životní prostředí. ITS tedy pomáhají řidičům, cestujícím, provozovatelům dopravy, veřejné správě atd. tím, že spojují jejich potřeby do jednoho systému.[21]

Pro nasazení ITS je potřeba vytvořit odpovídající infrastrukturu, jejíž hlavní části jsou senzory dopravy, komunikační prostředí a informační technologie. Senzory se starají o sběr dat pro ostatní systémy, které dle nasbíraných dat a informací dokáží určit různé parametry. Mezi základní parametry patří:

- Klasifikace vozidla
- Rychlost vozidla
- Hmotnost vozidla
- Rozvor a počet náprav
- Nápravové zatížení vozovky

- Detekce zastavení vozidla
- Detekce řazení vozidla do jiného pruhu či směru jízdy
- Hustota provozu

Senzory dělíme dle toho, zda je nutné zabudovat senzor do vozovky či kolejiště (destruktivní), nebo zda to nutné není (nedestruktivní). Umístění senzorů může být vedle komunikace, nad komunikací, na povrchu vozovky či kolejiště nebo do povrchu vozovky či kolejiště.

4.2 Rešerše v oblasti silničních vozidel

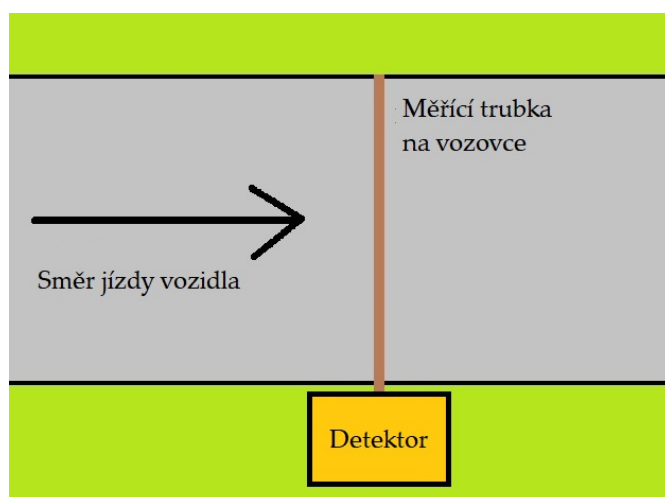
V této kapitole je provedeno rešeršní hledání používaných měřících technologií v oblasti silničních komunikací a vozidel. Hledání je rozděleno do tří částí (Konvenční senzory, Optické a vláknově-optické senzory, Interferometrické senzory).

4.2.1 Konvenční senzory

4.2.2 Pneumatické senzory

Pneumatické senzory se vyznačují přesností a snadnou instalací. První takovýto detektor byl zkonstruován již ve 20. letech minulého století. Na vozovku je položena trubka, ve které se při průjezdu auta změně tlak a tato změna je detekována. Použit lze pro měření intenzity provozu, nebo za použití dvou detektorů je možno měřit rychlost.

Slabinou této technologie je špatná schopnost rozpoznávat vozidla stojící či pohybující se příliš nízkou rychlostí. Dále může vzniknout problém s počítáním náprav v hustém provozu.[25]



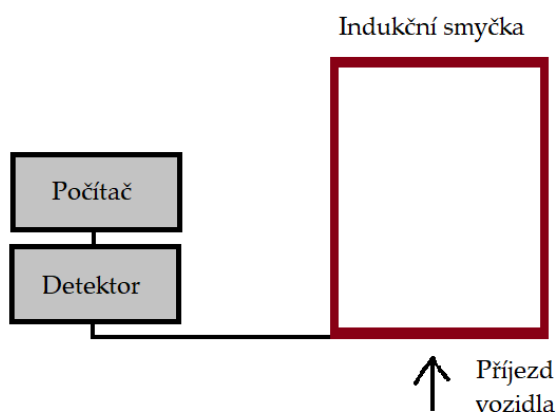
Obrázek 4.1: Schéma konstrukce pneumatického senzoru

4.2.3 Smyčky a magnetické senzory

Tyto senzory jsou elektromagnetické detektory se stacionárním polem, které jsou umístovány pod povrch vozovky. Díky své jednoduchosti a spolehlivosti to jsou jedny z nejčastěji používaných detektorů. Indukční senzor obsahuje indukční smyčku, detektor a analytickou jednotku.

Pomocí kabelového vodiče, umístěného 25 - 65 mm ve vozovce, je vytvořena indukční smyčka, a pokud okolo projíždí vozidlo, kovovou karoserií naruší elektromagnetické pole kolem indukční smyčky a změnu zaznamená detektor. Tento senzor tedy detekuje průjezd vozidla. Pokud se zařadí více senzorů za sebou, lze měřit i rychlost vozidla. Použit může být ale i pro určení klasifikace dopravního proudu, sběr dopravních dat atd. [22][23].

Výhodou je určitě snadná instalace tohoto řešení, plus jeho přesnost a spolehlivost. Mezi nevýhody by se mohlo řadit omezení použití u železobetonových konstrukcí a to, že vzhledem k instalaci ve vozovce stoupají náklady na odstranění případných poruch nebo dysfunkcí.[24]



Obrázek 4.2: Schéma konstrukce indukčního senzoru

4.2.4 CCTV Technologie

Technologie Closed Circuit Television(CCTV) je založena na detekci změny hodnot barev a jasu v digitalizovaném statickém obrazu. Tento systém se skládá z jedné nebo více videokamer, které jsou navzájem propojeny a výkonného počítače pro zpracování dat. CCTV počítá rychlost vozidla na základě doby průjezdu vozidla měřeným úsekem a známé vzdálenosti mezi bodem vjezdu a výjezdu. Umí dokonce i evidovat SPZ vozidel. [26][27]



Obrázek 4.3: Detekce pomocí CCTV[28]

4.2.5 Technologie Radio Frequency Identification

Tato technologie funguje na principu detekce projíždějících vozidel pomocí radiofrekvenčních vln. Systém je tvořen RFID čtečkou a aktivními, nebo pasivními štítky. Štítek tvoří anténa a paměť pro ukládání dat. Výhodou je rychlé a přesné zpracování informací.[29][30]

4.2.6 Optické a vláknově optické senzory v silniční dopravě

Tyto senzory mají různé principy činnosti a k detekci využívají optických vláken. Mezi řadu výhod patří například přesnost, vysoká citlivost, odolnost atd. Jsou tedy uplatitelné ve specifických systémech ITS.[31] Obecný popis je zpracován v kapitole 3.

4.2.7 Optické a infračervené senzory

Optický paprsek laserového či infračerveného světla je vysílán mezi dvěma body (vysílačem a přijímačem). V případě průjezdu vozidla je paprsek přerušen. Dalším způsobem instalace může být umístění přijímače i vysílače vedle sebe a detekovat paprsek odražený od projíždějícího vozidla. Opět můžeme měřit rychlost vozidel, pokud umístíme dva senzory ve specifické vzdálenosti od sebe.[32][33]

4.2.8 Fiber Bragg Grating (FBG Technologie)

V jádře vlákna je vytvořena struktura mřížky pomocí změn indexu lomu. Změna je tvořena periodicky, tzn. skokové změny indexu lomu se tvoří v pravidelných intervalech vzdálenosti. Když se tímto vláknem šíří světlo, odráží se určitá vlnová délka světla od těchto míst zpět. Tato vlnová

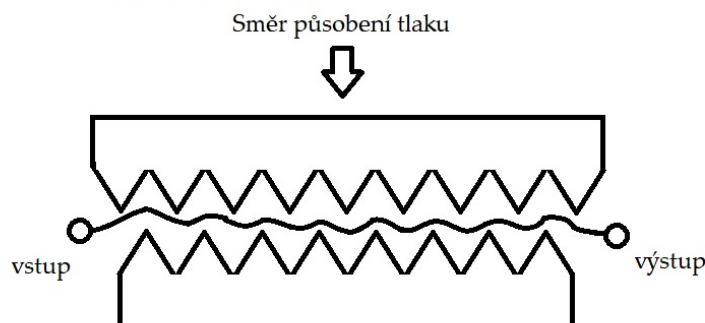
délka se nazývá Braggovská vlnová délka.

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda \quad (4.1)$$

Pokud dojde k mechanickému namáhání takového vlákna (průjezdu vozidla), dojde ke změně v mřížkové struktuře a odrazí se zpět jiná vlnová délka. Následně dojde k vyhodnocení rozdílu vlnových délek. Je možné měřit také rychlost vozidla, pokud se umístí dva senzory v pevně dané vzdálenosti. Senzory tohoto typu jsou destruktivní, umísťují se do vozovky.[34][35] Při měření v článku[35] byly použity dva principy senzorů. Jeden využívající mikroohybu, a druhý, který využívá koherenční zrnitosti. V obou případech působí jako senzor celá délka vlákna. Mikroohybový senzor vyžaduje speciální vlákno a speciální nastavení, zatímco v senzoru koherenční zrnitosti může být použito standardní vlákno.

4.2.9 Mikroohybové senzory

Pracují na principu srovnání vstupního a výstupního výkonu. Vlákno je uloženo do vozovky ve speciálním ochranném krytu. Průjezd vozidla způsobí deformaci a dojde k vyzáření světla do pláště. Tím vzniká rozdíl ve výstupním optickém výkonu. Při instalaci dvou senzorů v definované vzdálenosti lze měřit i rychlost vozidla, jak je popsáno zde[36]



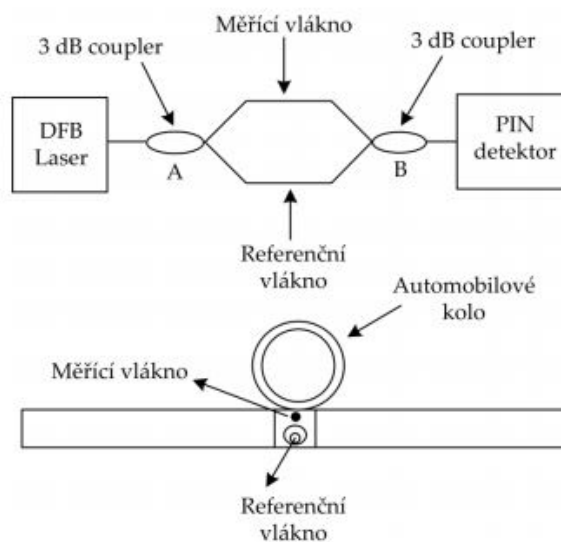
Obrázek 4.4: Princip mikroohybového senzoru

4.2.10 Weight-in-motion

Senzory s technologií WIM se využívají k měření hmotnosti vozidel za pohybu. Zatížení náprav a kol vozidel lze měřit ve více jízdních pruzích. Dále měří např. rychlost vozidla, šířku vozidla atd.

Zde [37] jsou popsány výsledky ze zkoumání speciálního optického vlákna jako snímače zatížení kol vozidel běžných rychlostí na dálnicích pro aplikace v systémech WIM. Použité vlákno má unikátní konstrukci se dvěma jádry s různými efektivními délkami optické dráhy.

Na obrázku lze vidět znázornění měřicího schéma, které bylo uvedeno v článku [38], kde bylo využito dvojramenného MZ interferometru.



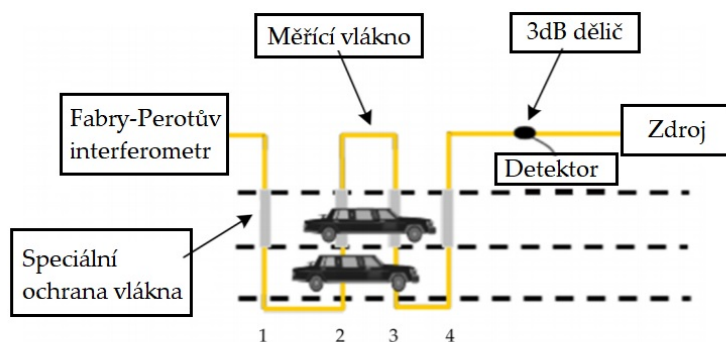
Obrázek 4.5: Základní schéma senzoru a uložení ramen interferometru [38]

V tomto článku[39] je popsán senzor optických vláken pro detekci náprav. Jsou prezentovány výsledky z terénních testů. Vyhodnocuje se výkonnost optického senzoru vozidla a diskutují se také metody hmotnosti vozidla v pohybu. Další článek[40] představuje optický vláknový detektor vozidel pro vozovky. Je založen na dvojramenném Michelsonově interferometru, který se umísťuje přímo do povrchu vozovky. Detektor je umístěn pod povrchem vozovky a není vystaven opotřebení, jako je tomu u běžně dostupných komerčně dostupných detektorů náprav.

4.2.11 Interferometrické senzory

Interferometrické senzory byly obecně popsány v podkapitole 3.1. Publikace[41] se zaměřuje na využití optických senzorů v dopravních aplikacích. Tyto senzory jsou založeny na optických komunikacích, využívají téměř identické prvky a komponenty jako klasická optická komunikace. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že v optických komunikacích omezujeme dopady prostředí na přenos samotných informací, zatímco v případě optických senzorů se hledají různá uspořádání, aby se tyto dopady maximalizovaly. Jsou zde popsány interferometrické senzory, pracující na základě porovnání světelných fází v měřicím a referenčním ramenu. Tyto fázové rozdíly lze měřit s

extrémní citlivostí, takže interferometry s optickými vlákny jsou mnohem přesnější než většina jiných senzorů. Jelikož je základem konstrukce optické vlákno, senzory jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení. Nabízejí také jednoduchost implementace, protože nevyžadují destruktivní instalaci. Rychlost vozidla lze zjistit instalací dvou senzorů ve specifikované vzdálenosti. Článek[42] obsahuje návrh vláknově optického senzoru pro systémy sběru dat o silničních vozidlech. Detekovat lze rychlost, typ vozidla, hmotnost a hustota provozu. Senzor využívá Fabry-Perotova interferometru. Snímací optické vlákno bylo navrženo se speciální kovovou ochranou a instalováno se na povrch vozovky. Měření bylo prováděno v reálném provozu, nicméně neproběhlo v delším časovém intervalu. Lze tedy nejspíše očekávat únavu materiálu použité ochrany vlákna. Použité schéma měření lze vidět na obrázku 4.6.

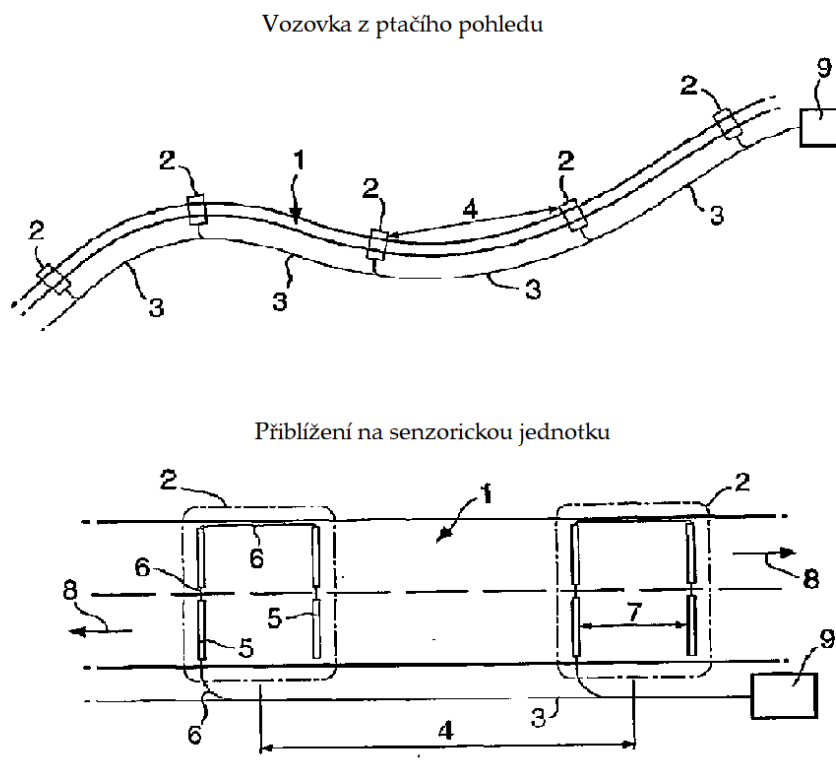


Obrázek 4.6: Schéma vláknově optického senzoru s F-P interferometrem

V tomto článku[43] je popsán vláknový optický interferometrický senzor a měřicí schéma včetně vstupních a výstupních prvků pro monitorování hustoty provozu. Navrhovaný měřicí systém je založen na implementaci senzoru s Mach-Zehnderovým interferometrem. Je konstruován pro detekci vibrací a akustické odezvy způsobené projížděním vozidel. Výhodou je jednoduchá implementace, protože senzor nemusí být instalován destruktivně do vozovky nebo kolejnic.

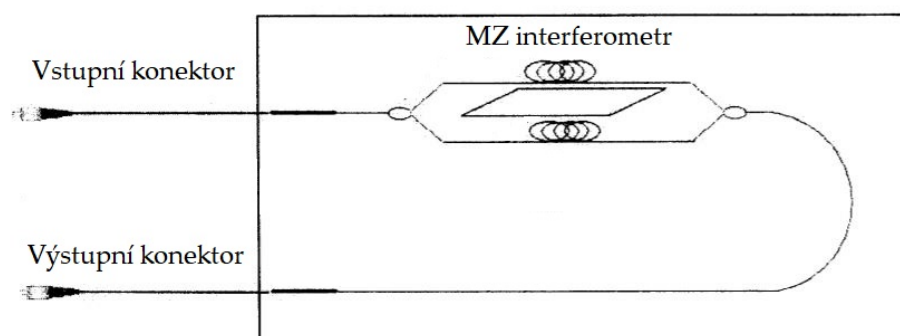
V tabulce 4.1 je zpracován souhrn aktuálně používaných vláknově optických technologií a senzorů v oblasti silniční infrastruktury.

V tomto[44] patentovém spise autoři popisují systém pro detekci průjezdu vozidel. Čísla v kulatých závorkách v tomto odstavci udávají označení prvků na obrázku 4.7. Tento systém obsahuje vždy alespoň jednu senzorovou stanici (2) a interferometrickou dotazovací jednotku (9). Pro měření rychlosti se senzorové stanice umísťují od sebe v dané vzdálenosti(4). Jedna senzorová stanice(2) obsahuje alespoň jeden senzor(5). Interferometrický dotazovací systém (9) je uzpůsoben tak, aby reagoval na optický fázový posun vytvořený v alespoň jednom senzoru v důsledku síly působící vozidlem projíždějícím alespoň jednou senzorovou stanicí (2).



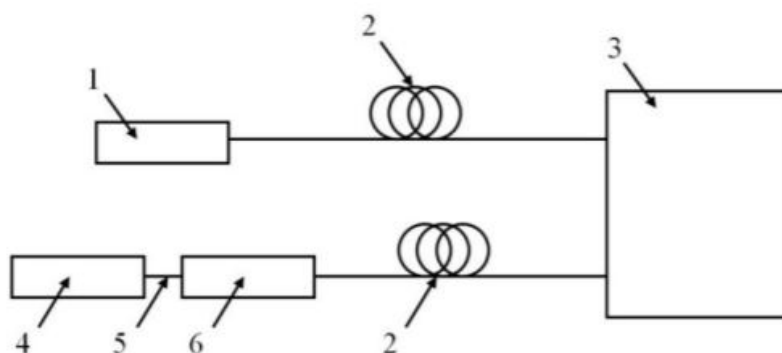
Obrázek 4.7: Schéma detekčního systému ze spisu[44]

Následující užitný vzor[45] popisuje detekci a měření rychlosti projíždějících vozidel pomocí senzoru se dvěma MZ interferometry. Model obsahuje světelný zdroj, sensorovou jednotku, detektor a jednotku pro sběr a zpracování dat. Senzor je zabudován do vozovky v ochranném kovovém krytu se speciální plastovou výplní.



Obrázek 4.8: Schéma senzoru z užitného vzoru[45]

Další patentový spis [46] popisuje optovláknový interferometrický senzor pro monitorování automobilového dopravního provozu. Tento senzor slouží pro kategorizaci projíždějícího vozidla a následné zařazení do kategorie osobní nebo nákladní automobil pomocí spektrální analýzy dat z použitého senzoru s Mach-Zehnderovým interferometrem. Dále je ve spisu uvedena možnost rozšíření možností senzoru o měření hmotnosti nebo rychlosti. Tuto skutečnost ale autoři spisu neověřili v praxi. Na obrázku vydíme popis senzoru obsahující laserový zdroj světla (1), ze kterého prochází světlo skrze optické vlákno (2) do senzoru (3), z kteréhož následně prochází dalším optickým vláknem (2) do fotodetektoru (6). Fotodetektor je poté propojen datovým kabelem (5) se zařízením pro zpracování signálu (4).



Obrázek 4.9: Schéma zapojení senzoru z patentového listu[46]

| | Způsob instalace | Upevnění senzoru | Měřicí dosah | Měřená veličina |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Distribuované systémy | do vozovky, podél silnice | mechanické upevnění, lepení nebo jiné způsoby | těsný kontakt se snímaným tělesem | deformace, vibrační a akustická odezva |
| Senzory FBG | do vozovky, na vozovku | mechanické upevnění, lepení nebo jiné způsoby | těsný kontakt se snímaným tělesem | deformace |
| Interferometrické senzory | podél silnice, do vozovky, na vozovku | mechanické upevnění, lepení nebo jiné způsoby | není potřeba těsného kontaktu, jednotky metrů od snímaného tělesa | akustická a vibrační odezva |

Tabulka 4.1: Shrnutí vláknově optických technologií využívaných v silniční dopravě

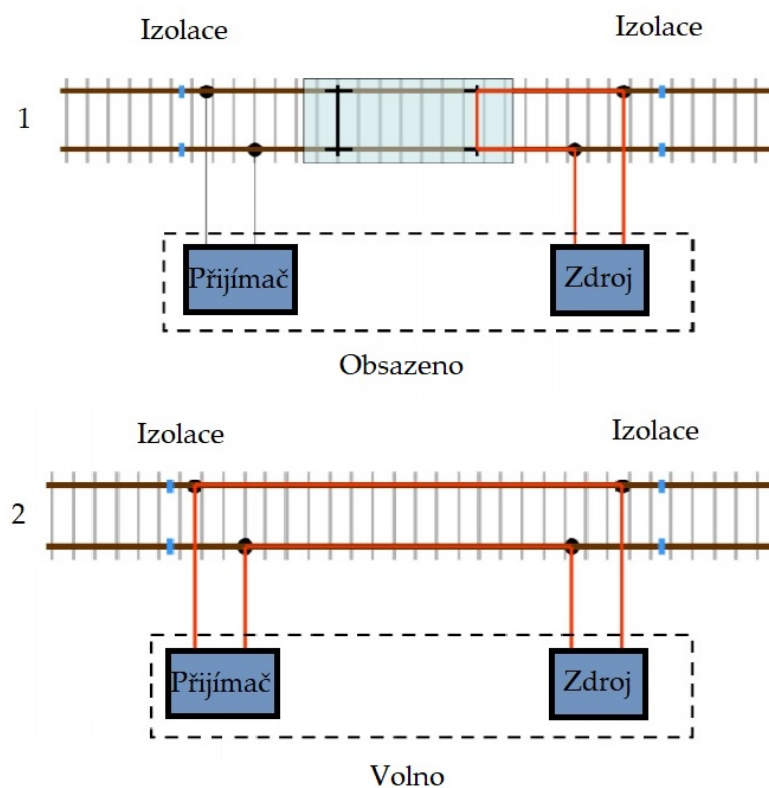
4.3 Rešerše v oblasti železničních vozidel

V této kapitole je provedeno rešeršní hledání používaných měřících technologií v oblasti železničních komunikací. Hledání je rozděleno do tří částí (Konvenční senzory, Optické a vláknově-optické senzory, Interferometrické senzory).

4.3.1 Konvenční senzory

4.3.2 Kolejové obvody

Pro monitoring vytížení železničních tratí se dnes používají takzvané kolejové obvody. Technologie kolejových obvodů pracuje na principu, že je trať rozdělena do stanovených úseků, které jsou navzájem elektricky izolovány. Pokud projede vlaková souprava, způsobí tím uzavření obvodu mezi dvěma kolejnicemi a tato souprava je detekována. Nevýhodou řešení je, že při použití tohoto systému je potřeba vytvořit kvalitní vodivé spojení mezi dvěma kolejnicemi. Další nevýhodou je určité zvýšení elektromagnetického rušení s nástupem nových trakčních technologií. Nevýhoda také spočívá v malé odolnosti vůči poškození např. úderem blesku.[47][48]



Obrázek 4.10: Princip kolejového obvodu

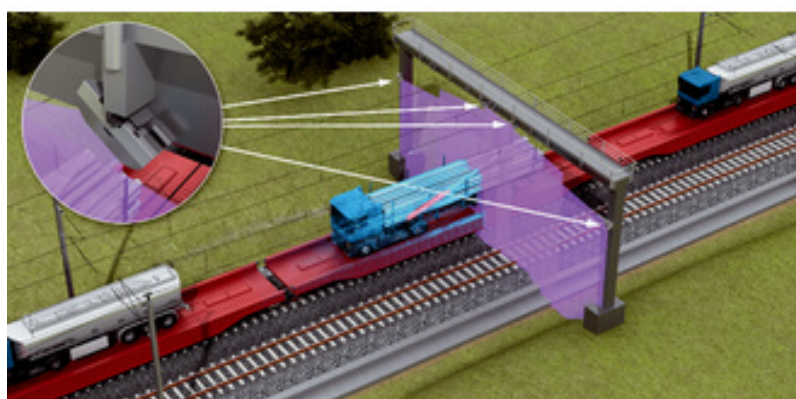
4.3.3 Optické a vláknově optické senzory

4.3.4 LIDAR(Light Detection And Ranging)

Technologie LIDAR se dnes využívá přednostně pro měření vzdálenosti, ale lze také nalézt využití i při měření atmosférických jevů, mapování terénu, atd. Výsledek této metody je obrovské množství bodů, které jsou dále zpracovatelné do digitálního 3D modelu snímaného objektu, nebo terénu. Při měření se využívá doba, za kterou vyzářený světelný pulz urazí vzdálenost ke snímanému objektu a zpět. LIDAR většinou pracuje v rozsahu vlnových délek 1060 nm až 1540 nm.

V oblasti železniční dopravy se tato technologie může využít například pro detekci projíždějících vozidel, či jejich bezprostřední blízkosti, nebo pro monitoring kolejíště. Při monitorování kolejíště jsou senzory umístěny přímo na železniční soupravu pomocí speciálních úchytů. Rozsah vzdálenosti pro detekci objektů je 0,2m až 10m.

Dále lze tento systém využít pro detekci přítomnosti soupravy, rychlost soupravy, délku soupravy, analýzu zakřivení kolejí a nebo snímání profilu soupravy, což je zobrazeno na obrázku. Tato technologie, resp. její princip, je velice podobná technologii CCTV. Výhodou je, že LIDAR není ovlivněn změnou intenzity slunečního záření. Nevýhodou ale může být snížení účinnosti v horším počasí (za mlhy). [49][50][51][52].



Obrázek 4.11: Snímání profilu soupravy pomocí LIDAR, převzato z [49]

4.3.5 Intenzitní senzory

Princip snímání u tohoto typu senzorů je založen na vyhodnocení výkonu, který se naváže z konce jednoho vlákna do druhého vlákna, při umístění vláken naproti sobě, resp. na relativním pohybu konců vláken vůči sobě. Vyhodnocován je poté výstupní výkon, který se naváže do druhého vlákna. Měření probíhá bodově, na každé měřicí místo je potřeba jednoho snímače. Toto řešení lze využít například pro detekci souprav, směru jízdy soupravy nebo měření rychlosti.

Mezi nevýhody těchto jednoduchých senzorů právě měření změn navázaného výstupního výkonu, protože z toho důvodu je snímač citlivý na změny teplot a je zde limitován dynamický rozsah měřených změn. [53][59]

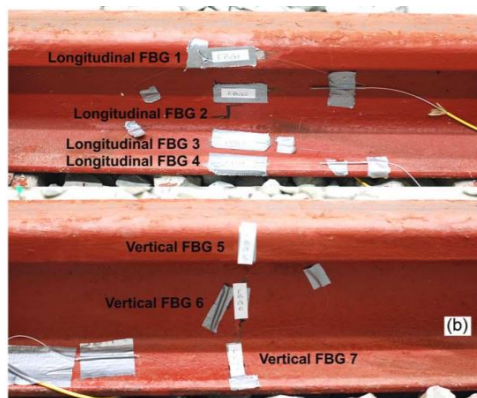
4.3.6 FBG senzory

FBG senzory jsou dnes nejspíš nejpoužívanější aplikací v rámci železniční dopravy. Většina z nich je založena na měření napětí způsobeném průchodem vlaku. Působením hmotnosti vlaku na koleje, resp. kolejový pražec vzniká deformační napětí, které v kolejnici vytváří místa s expanzí, neutrálním stavem nebo kompresí.

Článek[60] se zabývá možným využitím FBG senzorů pro detekci náprav v železničním inženýrství. Systém se v podstatě používá pro počítání vlakových náprav, které projíždějí kolem senzoru umístěného na kolejišti. Byly provedeny terénní zkoušky a bylo prokázáno, že FBG má velký potenciál pro nahrazení konvenčních systémů počítání železničních náprav. Počítadlo náprav FBG má oproti svým běžným protějškům mnoho výhod díky své elektrické odolnosti vůči hluku, schopnosti multiplexování, kompaktnosti a co je důležitější, jeho relativně nízkým nákladům na konstrukci.

Tento článek[61] představuje vysoce citlivé prostředky pro monitorování železnic na základě měření vibrací. FBG akcelerometry umístěné na pražci byly použity jako senzorové hlavy, což výrazně usnadnilo montážní práce snímače pole ve srovnání s umístěním na patě kolejnice. Optimalizovaný algoritmus demodulace signálu byl účinně použit pro extrakci informace o počtu náprav a průměrné rychlosti z akcelerometru. Vynikající schopnost vyvinutého systému získávat oba parametry byla prokázána v průběhu běžných provozních zkoušek prováděných na belgické železniční trati. Výhodou je jistě snadná instalace, multifunkční diagnostika, dobrá integrita dat.

Následující publikace [62][63][64][65] se zaměřují na experimentální měření a ověřují využití FBG senzorů v železniční dopravě. V rámci těchto měření byly zkoumány různé typy Braggových mřížek, upevňovány na stojinu, nebo na patu kolejnice. Použity byly různé formy zapouzdření. Dle měření bylo možno určit parametry jako detekce soupravy, identifikace směru jízdy, rychlost soupravy, nebo počet vlakových souprav.



Obrázek 4.12: Způsoby upevnění FBG senzorů na kolejnici[65]

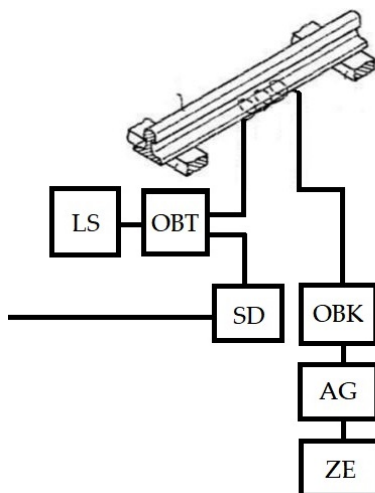
4.3.7 Interferometrické senzory

V rámci železniční dopravy lze využít i interferometrických senzorů, i když zatím není mnoho publikací zaměřených na tuto problematiku.

Článek[66] se zaměřuje na využití optovláknového senzoru akustické odezvy pro monitorování kolejové dopravy na velké vzdálenosti. Akustická odezva způsobená kolejovým vozidlem, nebo vlakovou soupravou je zaznamenána citlivým interferometrickým senzorem a dále zpracována vyhodnocovací jednotkou. Interferometrické senzory lze při správné konfiguraci využít jako senzory akustické odezvy a jsou tedy vhodné pro toto využití. Lze takto detekovat průjezd soupravy, v případě použití dvou senzorů lze měřit i rychlost vlakové soupravy.

Autoři článku[67] popisují implementaci senzorů s Fabry-Perotovým interferometrem do prefabrikovaných betonových pražců přímo při výrobě. Tyto pražce jsou podepřeny betonovým nebo asfaltovým podkladem. Článek popisuje měření a rozebírá aspekty týkající se návrhu snímače a prefabrikace snímácích pražců i postup zapuštění do betonové dráhy. Měření byla prováděna na zkušebním vzorku s plným rozsahem (deskový pás o délce 6,45 m), poté i na skutečné vysokorychlostní trati. Senzory lze využít pro detekci soupravy, zjištění počtu náprav nebo určení směru jízdy. V případě využití více senzorů lze určit rychlost kolejové soupravy.

Následující patentový spis [68] popisuje interferometrický senzor, sloužící k detekci vlakových souprav a pro určení počtu náprav. Detekce je založena na principu snímání vibrační odezvy způsobené vlakovou soupravou při průjezdu. Sensorická část senzoru musí být v těsném kontaktu s kolejnicí, referenční část včetně vyhodnocovací části je umístěna mimo koleje. Na obrázku 4.13 lze vidět měřicí schéma, skládající se z laseru (LS), vazebního členu (OBT), referenční části (SD), vazebního členu (OBK) a vyhodnocovací části (AG a ZE).



Obrázek 4.13: Schéma zapojení interferometrického senzoru a implementace na kolejnici

5 Úvod do praktické části

V této části práce se zaměřím na teoretický popis měření vibračně-akustické odezvy pomocí Mach-Zehnderova interferometru. Dále zde bude k nalezení popis a schéma měření a teoreticky rozebrány prvky, které byly při měření použity a software, který sloužil ke zpracování naměřených hodnot.

V kapitole 6 se zaměřím na konstrukci a postup při konstrukci samotného senzoru, včetně použitého materiálu a součástek.

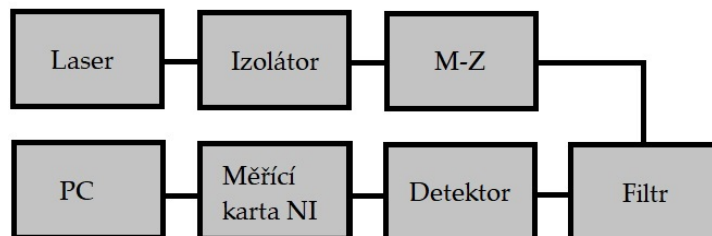
V kapitole 7 rozeberu a popíšu samotné měření a jeho průběh. Také splním část zadání o měření frekvenčního rozsahu senzoru.

5.1 Měření vibračně-akustické odezvy pomocí MZ interferometru

Algoritmus vyvinutý pro účely detekce projíždějících vozidel je založen na vyhodnocování užitečného signálu, vyprodukovaného projíždějícím vozidlem. V případě, že se vozidlo přibližuje k senzoru, vytváří vibračně-akustickou odezvu, jejíž intenzita roste úměrně se snižující se vzdáleností vozidla od senzoru. Intenzita opět klesá, jakmile se vozidlo začne opět od senzoru vzdalovat. Maximální intenzity této odezvy je dosaženo v době, kdy je vozidlo na úrovni senzoru. Algoritmus hledá první amplitudové maximum (průjezd přední nápravy vozidla) nad nastavenou rozhodovací úrovní, která je stanovena s ohledem na šumové pozadí. Toto maximum se poté projeví na výstupu z fotodetektoru a jeho poloha udává čas průjezdu vozidla. Toto amplitudové maximum je charakteristické pro všechny vozidla. Rozdíl je pak v případě osobních vozidel, kdy je maximum pouze jedno. Je to způsobeno rozlišovací schopností senzoru, protože tím, jakou má vozidlo rychlost v kombinaci s malou vzdáleností obou náprav je způsobena odezva, která je zaznamenána jako pouze jedno charakteristické maximum. Pokud má snímané vozidlo váhu nad 3,5 tuny, tak lze při nižší rychlosti a délce vozidla nad 10 metrů detekovat i více, než jedno maximum. Každé toto maximum poté charakterizuje každou jednotlivou nápravu.

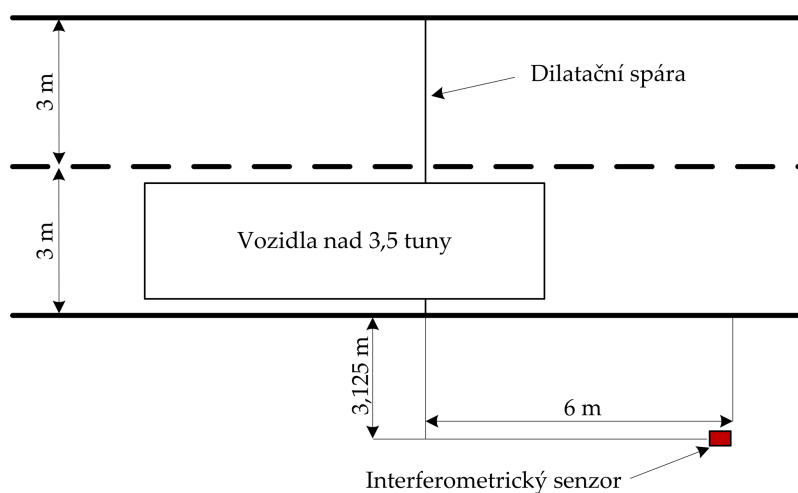
5.2 Schéma senzoru s MZ interferometrem

Měřicí soustava, která byla použita v rámci této práce byla velice podobná standardnímu zapojení MZ interferometru.



Obrázek 5.1: Schéma měřící soustavy

Pro měření v reálném provozu bylo použito následující měřící schéma.



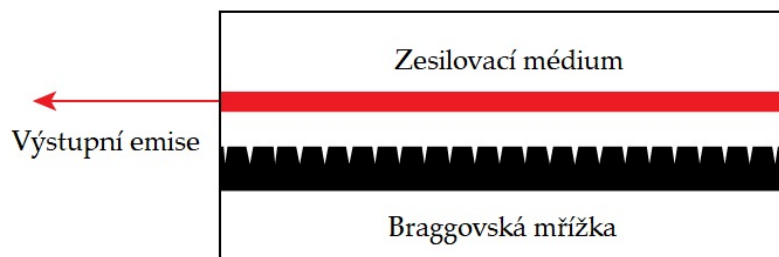
Obrázek 5.2: Použité měřící schéma pro detekci vozidel nad 3,5 tuny

5.3 Použité optické prvky a měřící přístroje

5.3.1 Laserová dioda

Pro konstrukci interferometrického senzoru je potřeba zvolit kvalitní zdroj koherentního záření (viz kapitola 2.3). Pro účel této práce byla vybrána laserová dioda DFB (distributed feedback laser) o výstupním výkonu 3 mW, pracovní vlnové délce 1500 nm a šířce spektrální čáry 0,01 nm.

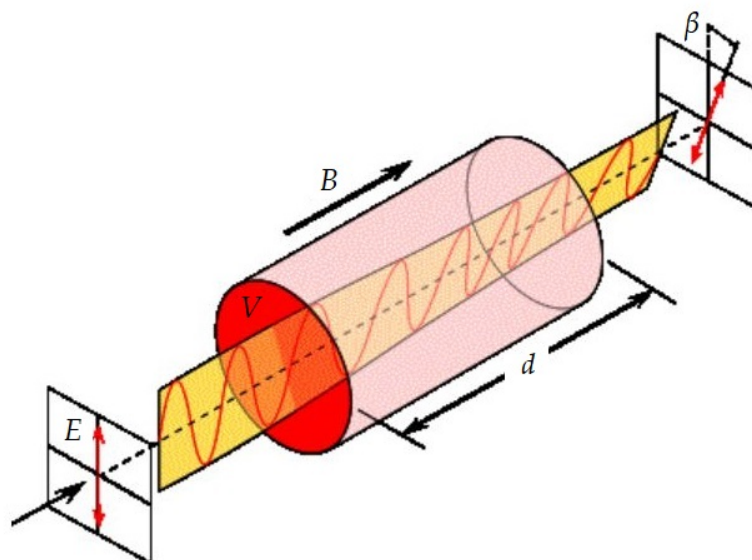
Rezonátor laseru s distribuovanou zpětnou vazbou je tvořen periodickou strukturou, která je distribuována jako reflektor v rozsahu vlnových délek působení laseru a obsahuje zesilovací médium. [58]



Obrázek 5.3: Rezonátor DFB laseru

5.3.2 Izolátor

Optický izolátor je optická součástka, která má funkci takovou, že propouští světlo pouze v jednom směru. Tím pádem zamezuje tomu, aby se odražené světlo vracelo zpět ke zdroji záření. Optický izolátor je vlastně alternativa Faradayova rotátoru. Faradayův rotátor je základní optické zařízení, umožňující skrze přesně nastavené magnetické pole snadno změnit polarizaci světla. Toto se využívá pro nejrůznější vědecké aplikace. Rotátory se velmi často aplikují v optických telekomunikacích a v laserové fyzice.



Obrázek 5.4: Faradayova rotace

Míra stočení polarizační roviny je přímo úměrná dráze d , po níž se světelné záření šíří v prostředí. Přímo úměrná je i velikosti složky vektoru magnetické indukce B ve směru šíření světla. Orientace vektoru pak určuje směr otáčení polarizační roviny. Rovina polarizace se otočí o úhel β , jehož velikost lze vypočítat pomocí následující rovnice.[54]

$$\beta = B * d * V \quad (5.1)$$

V je zde koeficientem úměrnosti, neboli Verdetova konstanta, která je charakteristická pro dané prostředí.

5.3.3 Vazební člen

Vazební člen je pasivní optický prvek používaný v optických komunikacích. Jeho hlavní funkcí je rozdělení vstupního paprsku do dvou či více výstupních paprsků. Výkon výstupních paprsků závisí na dělicím poměru vazebního členu, tudíž můžou, ale nemusí mít stejný optický výkon. Pro účely této práce byly použity 2 vazební členy s poměrem 50:50. Paprsek byl tedy vazebním členem rozdělen do dvou větví totožných paprsků. Druhým vazebním členem byl opět sloučen a poté přiveden na výstup. Dělicí poměr byl zvolen z toho důvodu, že největší kontrast má interference světla právě tehdy, když jsou inzenzity obou vlnění stejné.[55]



Obrázek 5.5: Vazební člen[56]

5.3.4 Měřicí přístroje

5.3.4.1 Filtr

- Horní propust
- Rezonanční frekvence $f_0 = 2 \text{ Hz}$
- Odstranění stejnosměrné složky
- Odstranění nežádoucích nízkých frekvencí

5.3.4.2 Fotodetektor

- ThorLabs PDA20H-EC - Amplified Detector
- PbSe
- Rozsah vlnových délek: $1,5\mu\text{m}$ $4,8\mu\text{m}$
- Šířka pásma: až 10 kHz
- Výstupní napětí: 5V / 10V
- Vstupní výkon: 220-240V, 5W



Obrázek 5.6: Použitý fotodetektor

5.3.4.3 Software

- LabView Signal Express 2017

5.3.4.4 Měřicí karta

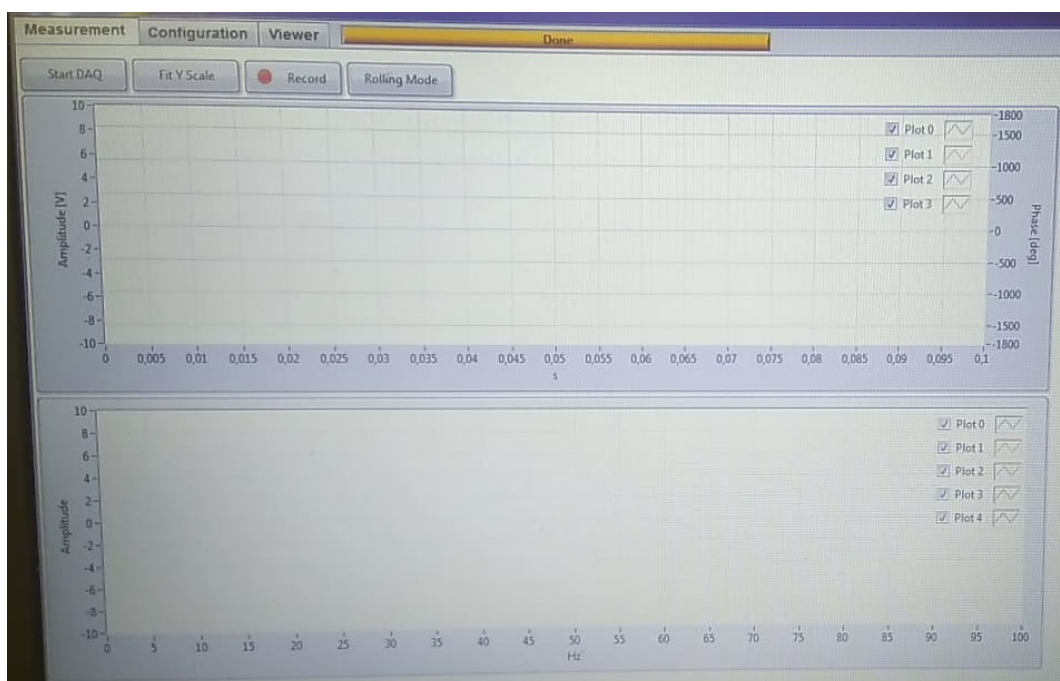
- NI myDAQ
- 8 digitálních I/O
- připojení přes USB konektor k PC



Obrázek 5.7: Měřicí karta NI myDAQ

5.4 Softwarové zpracování signálu

Monitorovací aplikace vyhodnocuje úroveň šumového pozadí s přednastavenými limity zajišťující dostatečný odstup užitečného signálu od šumu (minimálně 3dB) a když je úroveň vibračně-akustické odezvy od vozidel vyšší než tato limitní hodnota, systém indikuje projíždějící auto. Použití relativní úrovně místo absolutní zvyšuje odolnost systému proti falešné detekci vozidla způsobenou šumem z okolního prostředí.



Obrázek 5.8: Monitorovací aplikace

6 Konstrukce opticko-vláknového senzoru

6.1 Použité součásti a materiál

- Krabice Malpro S-BOX 716 380x300x120mm IP65 šedá



Obrázek 6.1: Malpro S-BOX 716

- Polystyren EPS Perimetr SD 150
- 2x Průchodka EG-11BL, PG závit, vnitřní průměr 15mm



Obrázek 6.2: Průchodka EG-11BL

- 2x Single Mode Dual Window Coupler 50:50, konektor FC/APC viz obr. 5.2.

6.2 Postup konstrukce

Nejdříve bylo potřeba z velkého kusu polystyrenu vyříznout 2 menší kusy o stejné ploše a vydlabat je takovým způsobem, aby při položení těchto dvou kusů na sebe vznikla dutina (ochranné pouzdro), ve které budou uloženy oba vazební členy společně s referenční větví. Dále byly do krabice vyvrtány otvory na vstupní a výstupní kabeláž interferometru a do těchto otvorů byly umístěny průchodky. Poté byly do spodní části ochranného pouzdra vyřezány vývody pro kabeláž a spodní část byla připevněna ke dnu krabice, která sloužila jako úložný box senzoru

(viz obrázek 6.3). Poté byly do dutiny ve spodní části ochranného pouzdra upevněny vazební členy, vyvedeny kabely a zapojena referenční větev.

Původně byla měřicí větev vedena po dnu úložného boxu, které ovšem nemělo hladký povrch (lze vidět na obrázku). Po konzultaci s vedoucím práce byla měřicí větev vedena po opačném hladkém dnu úložného boxu, aby vzorek na původním dnu nemohl způsobit chybu měření.



Obrázek 6.3: Průběh konstrukce

Nakonec proběhlo jen pár drobných úprav výšky polystyrenového ochranného pouzdra a upevnění všech součástí tak, aby nemohlo dojít k destrukci celé sestavy např. při převozu, nebo jiné manipulaci. Výsledný vzhled sestaveného senzoru lze vidět na obrázku 6.4.

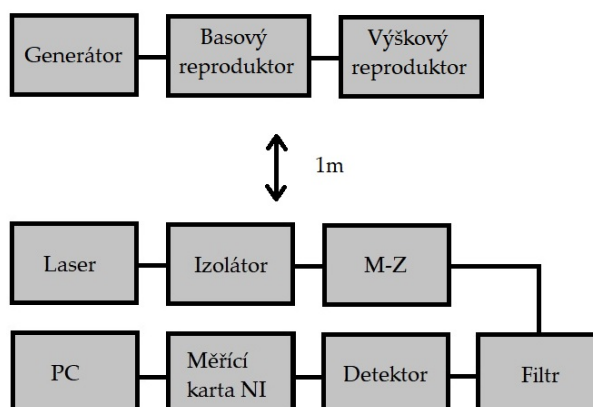


Obrázek 6.4: Sestavený senzor

7 Měření

7.1 Měření frekvenčního rozsahu senzoru

V této podkapitole je popsán princip určení frekvenčního rozsahu zkonstruovaného senzoru, tedy rozsahu, ve kterém je senzor schopen věrohodně detekovat vibračně-akustickou odezvu z okolního prostředí. Byly použity dva typy reproduktoru, basový a výškový, oba dva buzeny harmonickým signálem o amplitudě 20V z generátoru. Reproduktoři byly umístěny cca 1 metr od senzoru. Zjištění probíhá laděním frekvence buzeného signálu. Pokud vidíme znatelný peak ve frekvenčním spektru, měníme frekvenci buzeného signálu, dokud peak nesplyne s šumem. Poslední hodnota viditelného peaku je mezní frekvencí. Toto bylo provedeno pro horní i dolní mez. Byla zjištěna spodní hranice 2 Hz a horní hranice 140 Hz. Dle ISO 4866: 2010 [57] je vibračně-akustická odezva kamionové dopravy v rozmezí 75-95 Hz, takže frekvenční rozsah senzoru splňuje požadavky pro detekci těchto vozidel.



Obrázek 7.1: Schéma pro měření frekvenčního rozsahu senzoru

7.2 Praktické měření

Praktická měření, respektive detekce automobilových vozidel byla realizována celkem v 5 testovacích dnech, kdy bylo celkem zaznamenáno interferometrickým senzorem 443 automobilových vozidel nad 3,5 tuny. Pro praktickou instalaci je z hlediska bezpečnosti možné umístit senzor minimálně 1 metr za krajnicí vozovky, největší vzdálenost činí 3,125 metrů od krajnice vozovky. Senzor je dle zadání určen pro detekci vozidel v nebezpečném prostředí jako jsou např. důlní šachty atp. Jelikož by bylo velice obtížné se na takovéto místa dostat, měření proběhlo v reálném provozu na pozemní komunikaci. Měření bylo realizováno na 3 místech ve městě Ostrava, a to

Svinov mosty, dále na ulici Studentská a na ulici Celní. Rozsah rychlostí měřených vozidel nad 3,5 tuny lze vymezit od 30 do 80 km/h dle limitace uvedeného dopravního značení.

Na následujících obrázcích lze vidět fotografii jednoho z měřících stanovišť a dále koláž vybraných fotografií projíždějících nákladních vozů.



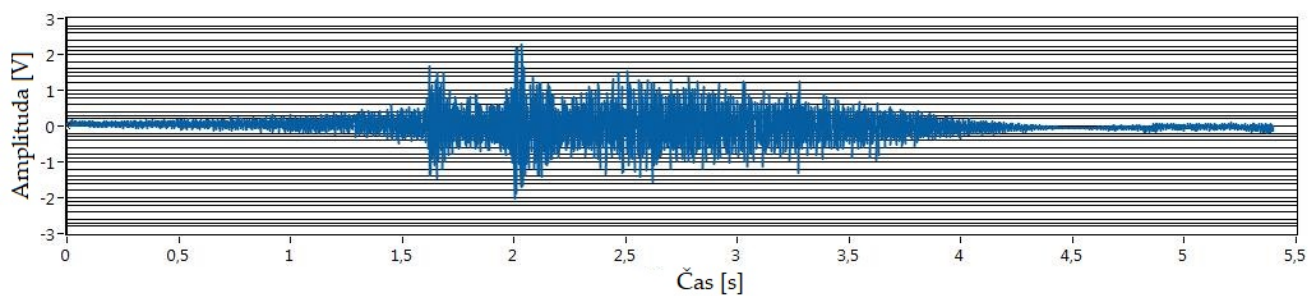
Obrázek 7.2: Měřící stanoviště Svinov mosty



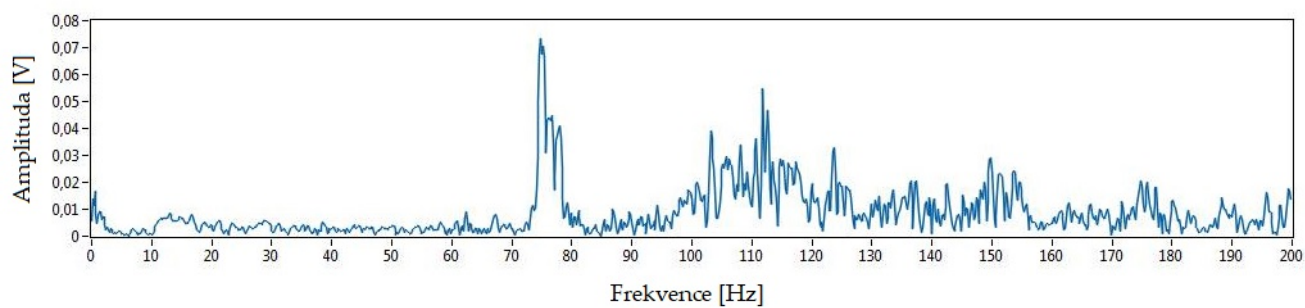
Obrázek 7.3: Průběh měření - koláž vybraných fotografií průjezdů

Tabulka níže popisuje jednotlivé měřicí dny, vzdálenost senzoru od krajnice vozovky, počet zaznamenaných vozidel senzorem a úspěšnost detekce interferometrickým senzorem vyjádřenou v procentech. Jako reference pro stanovení počtu vozidel jsme využili praktickou kalkulaci měřící osobou v místech měření.

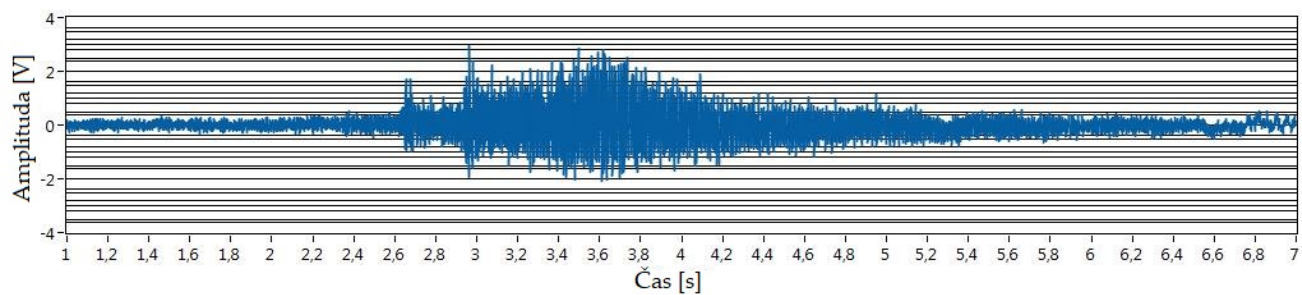
Lze pozorovat, že vlivem zvětšující se vzdálenosti klesá úspěšnost detekce vozidel. Tato skutečnost může být dána nedokonalou manuální konstrukcí senzoru, vnějšími vlivy prostředí jako počasí, podkladovou vrstvou (v rámci měření vždy asfalt), stejně tak různými parametry vozidel apod. Je tedy důležité se pro navazující vývoj senzoru na tyto oblasti zaměřit. K tomu by ale bylo potřeba dlouhodobého zkoumání, které nelze realizovat v rámci krátkého časového úseku diplomové práce.



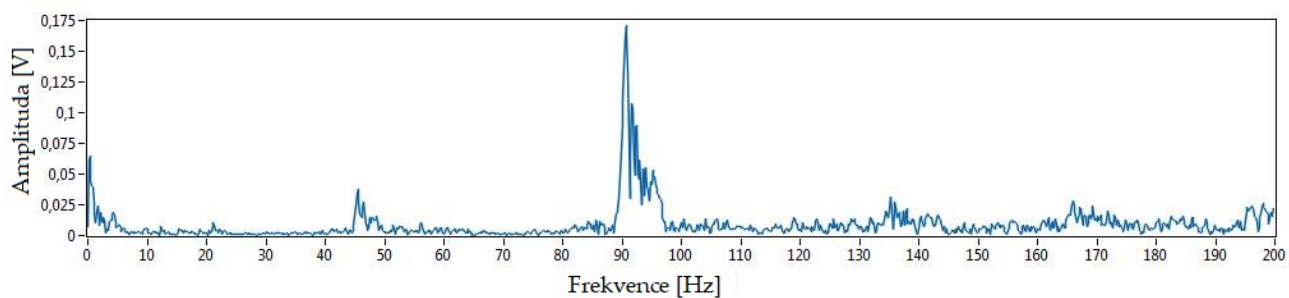
Obrázek 7.4: Vibračně-akustická odezva projíždějícího autobusu v časovém spektru



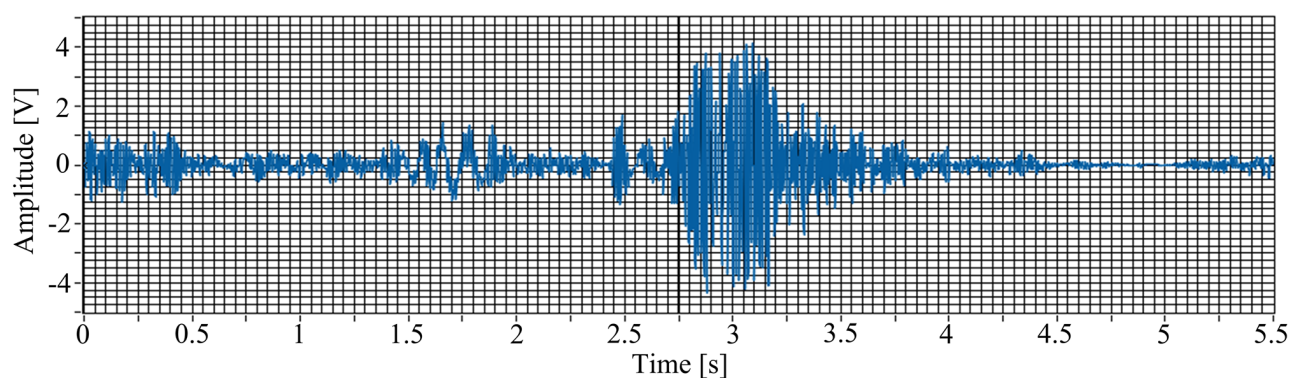
Obrázek 7.5: Vibračně-akustická odezva projíždějícího autobusu ve frekvenčním spektru



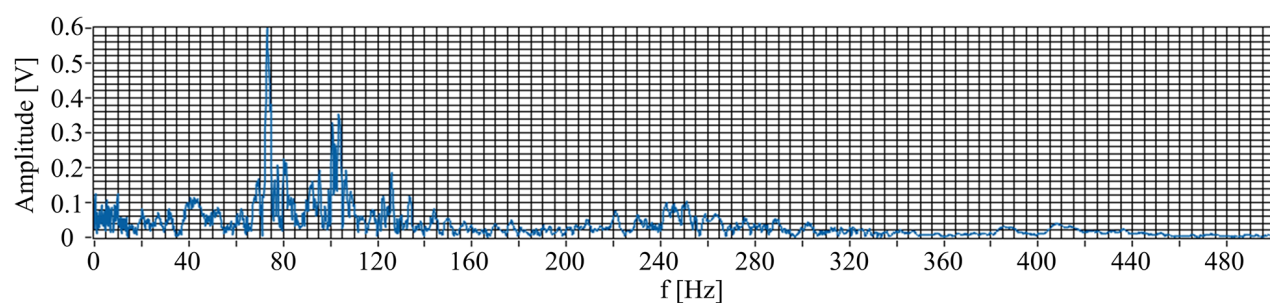
Obrázek 7.6: Vibračně-akustická odezva projíždějícího kamionu v časovém spektru



Obrázek 7.7: Vibračně-akustická odezva projíždějícího kamionu ve frekvenčním spektru



Obrázek 7.8: Vibračně-akustická odezva projíždějícího krátkého nákladního vozidla v časovém spektru



Obrázek 7.9: Vibračně-akustická odezva projíždějícího krátkého nákladního vozidla ve frekvenčním spektru

Na obrázcích můžeme vidět charakteristiky v časovém i frekvenčním spektru projíždějících vozidel nad 3,5 tuny. První dva obrázky zobrazují charakteristiky odezvy projíždějícího auto-

busu MHD. Další dva obrázky zobrazují charakteristiky odezvy projíždějícího kamionu. Poslední dva obrázky zobrazují charakteristiky odezvy projíždějícího krátkého nákladního vozidla. Tento průjezd byl detekován na měřicím stanovišti na ulici Studentská. Dle krátkého trvání odezvy v čase lze určit, že vozidlo jelo velmi rychle.

Viditelná maxima ve frekvenčním spektru při kmitočtu 75-95 Hz jsou typickým projevem dynamických efektů v důsledku těžké kamionové dopravy, což odpovídá rozsahům uvedeným v ISO 4866: 2010 [57]

| Měřicí den[-] | Počet průjezdů[-] | Úspěšnost detekce [%] | Vzdálenost senzoru od krajnice vozovky [m] |
|-------------------|-------------------|-----------------------|--|
| 1 | 86 | 99,12 | 1 |
| 2 | 93 | 98,76 | 1 |
| 3 | 112 | 99,34 | 1,5 |
| 4 | 74 | 97,17 | 3,125 |
| 5 | 78 | 98,34 | 2 |
| Sumarizace | 443 | 98,54 | - |

Tabulka 7.1: Výsledky měření v reálném provozu

8 Závěr

Závěrem bych rád shrnul tuto práci, výsledky této práce a celkový přínos. V rámci teoretické části této práce byly obecně popsány vlastnosti světla, optické vlákna a vláknově optické senzory. V dalších kapitolách byla zpracována rešerše o dosavadním stavu techniky v dopravním provozu, byl sestaven vláknově optický senzor na bázi Mach-Zhenderova interferometru a byl proměřen jeho frekvenční rozsah. V úvodu do praktické části je popsán princip algoritmu pro vyhodnocení vibračně-akustické odezvy projíždějících vozidel, vyobrazeno schéma senzoru, popis použitých měřících přístrojů a softwaru pro zpracování signálu.

V praktické části je popis použitých součástí včetně samotné konstrukce senzoru. Dále se praktická část zaměřuje na měření v reálném provozu. Bylo uskutečněno 5 měřících dní, během kterých bylo detekováno celkem 443 nákladních vozidel na 3 různých stanovištích s vysokou úspěšností detekce 98,54%. Z důvodu nemožnosti přístupu do nebezpečných prostředí např. důlní šachty bylo měření uskutečněno v silničním provozu, avšak tyto výsledky jsou přenositelné i do nebezpečných prostředí. Výstupem práce je informace, že vzdálenost senzoru od krajnice vozovky má určitý vliv na jeho citlivost respektive úspěšnost detekce vozidel. Tato problematika ale nebyla dále zkoumána, jelikož by se jednalo o dlouhodobý výzkum, který nelze časově uskutečnit v rámci této diplomové práce.

Splněny všechny body zadání. Mezi největší výhody představeného typu interferometrického senzoru patří nízká hmotnost, nízká cena v rámci jednotek tisíc korun za senzor, malé rozměry, ale také možnost oddělení místa měření od místa zpracování signálu a to v rámci stovek metrů až jednotek kilometrů. Omezení je pouze ve výkonu použitého zdroje záření a v útlumu použitých optických vláken. Viditelná maxima ve frekvenčním spektru ve frekvenčním rozsahu 75-95 Hz jsou typickým projevem dynamických efektů v důsledku těžké kamionové dopravy, což odpovídá rozsahům uvedeným v ISO 4866: 2010.

Literatura

- [1] Světlo jako elektromagnetické vlnění :: MEF. Fyzika :: MEF [online] [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/434-svetlo-jakoelektromagneticke-vlneni>
- [2] Polarizace světla :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla>
- [3] Polarizace světla [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10_polar/10_polar.htm
- [4] Disperze světla [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/disperze-svetla>
- [5] Disperze (rozklad) světla :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/441-disperze-rozklad-svetla>
- [6] Odraz a lom [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/propagation/index.html
- [7] Koherence záření [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0206.htm>
- [8] Interference vlnění [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: http://kvinta-html.wz.cz/fyzika/mechanicke_kmitani_a_vlneni/mechanicke_vlneni/interference_vlneni.htm
- [9] Optická vlákna :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/557-opticka-vlakna>
- [10] Výroba optického vlákna [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/827>
- [11] Numerická apertura a její měření [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/822>
- [12] Single-mode Fiber vs. Multimode Fiber: Which to Choose?. Fiber Optic Network Products - Share various fiber optic network accessories [online]. Dostupné z: <http://www.fiberopticshare.com/single-mode-fiber-vs-multimode-fiber-choose-2.html>
- [13] Laserové diody 1 - Princip funkce laserových diod [online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>

- [14] Emise a absorpce světla :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 14.03.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [15] LOPÉZ-HIGUERA, J. M.: Handbook of optical fibersensing technology. John Wiley and sons, Ltd. (2002), ISBN 0-471-82053-9.
- [16] UDD, E.: Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. John Wiley and sons, Inc. (1991), ISBN 0-471-83007-0.
- [17] Mach-Zehnder Interferometer [online]. Copyright © David M. Harrison [cit. 14.03.2019]. Dostupné z: <https://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/MachZehnder/MachZehnder.html>
- [18] GHATAK, Ajoy; THYAGARAJAN, K. Introduction to fiber optics. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 565 s. ISBN 0521571200.
- [19] TOTANI, S. Development and current status of CACS (comprehensive automobile traffic control system). In: 30th IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 1980, s. 336-341. DOI:10.1109/VTC.1980.1622831.
- [20] AOYAMA, K.-I. Universal traffic management system (UTMS) in Japan. In: Proceedings of VNIS'94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference. IEEE, 1994, s. 619-622. DOI: 10.1109/VNIS.1994.396778. ISBN 0-7803-2105-7.
- [21] GHOSH, Sumit a Tony S. LEE. Intelligent transportation systems: smart and green infrastructure design. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 14-398-3518-7
- [22] LU, Xiao-Yun, Pravin VARAIYA, Roberto HOROWITZ, Zhaomiao GUO a Joe PALEN. Estimating Traffic Speed with Single Inductive Loop Event Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2012, 2308, s. 157-166. DOI: 10.3141/2308- 17. ISSN 0361-1981.
- [23] CHERRETT, T., H. BELL a M. MCDONALD. Estimating vehicle speed using single inductive loop detectors. Transport. 2001, 147(1), s. 23-32. DOI: 10.1680/tran.147.1.23.40491. ISSN 0965-092x.
- [24] MARKEVICIUS, Vytautas, Dangirutis NAVIKAS, Mindaugas ZILYS, Darius ANDRIUKAITIS, Algimantas VALINEVICIUS a Mindaugas CEPENAS. Dynamic Vehicle Detection via the Use of Magnetic Field Sensors. Sensors. 2016, 16(1), s. 78-. DOI: 10.3390/s16010078. ISSN 1424-8220

- [25] MCGOWEN, Patrick a Michael SANDERSON. Accuracy of Pneumatic Road Tube Counters. In: Institute of Transportation Engineers (ITE). Western District Annual Meeting, 2011. Institute of Transportation Engineers (ITE), 2011, s. 1-17. ISBN 01491364.
- [26] HSIEH, Cheng-You a Yu-Shuen WANG. Traffic situation visualization based on video composition. Computers. 2016, 54. s. 1-7. DOI: 10.1016/j.cag.2015.07.007. ISSN 00978493.
- [27] ZHANG, Di, Jiazhong HE, Van Anh LE a Van Duc NGUYEN. Super-resolution reconstruction of low-resolution vehicle plates: A comparative study and a new algorithm. In: 2014 7th International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2014. s. 359-364. DOI: 10.1109/CISP.2014.7003806. ISBN 978-1-4799-5835-1.
- [28] A Surveillance Video Based Anomaly Detection Technology for Intelligent Transportation - Fujitsu China. Document Moved [online]. Copyright © Fujitsu [cit. 26.03.2019]. Dostupné z: <http://www.fujitsu.com/cn/en/about/resources/news/press-releases/2016/frdc-0401.html>
- [29] REDDY, G S Ajay Kumar, S. V. Jagadesh CHANDRA, B. Naresh Kumar REDDY, A. S. M. ZAIN a W. N. F. W. ARIFFIN. Developing the fabricated system of automatic vehicle identification using RFID based poultry traceability system: A comparative study and a new algorithm. In: International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014). IEEE, 2014. s. 1-6. DOI: 10.1109/ICICES.2014.7034186. ISBN 978-1-4799-3834-6.
- [30] SARBINI, M Adi M, Syed Bilal HASSAN, Tan Soon JIANN, PM Nazri PH AHMAD a W. N. F. W. ARIFFIN. Design of a RFID-based speed monitoring system for road vehicles in Brunei Darussalam: A comparative study and a new algorithm. In: 2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT). IEEE, 2014. s. 219-223. DOI: 10.1109/I4CT.2014.6914178. ISBN 978-1-4799-4555-9.
- [31] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, Richard O. CLAUS, Noel ZABARONICK, Pushkin KACHROO, Kaan OZBAY a Alan C. CHACHICH. Advances in optical fiber sensors for vehicle detection. In: Proceedings of SPIE 3207, 1998. s. 318-322. DOI: 10.1117/12.300853
- [32] AI, Hong a Yuning ZHENG. Characterization of a Traffic Management System Using Pyroelectric Infrared Sensors. Instrumentation Science and Technology. 43 (3), 2015. s. 319-333. DOI: 10.1080/10739149.2014.1002040.
- [33] RIVAS-LOPEZ, Moises, Carlos A. GOMEZ-SANCHEZ, Javier RIVERA-CASTILLO, Oleg SERGIYENKO, Wendy FLORES-FUENTES, Julio C. RODRIGUEZ-QUINONEZ a Pedro

- MAYORGA-ORTIZ. Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2015. s. 972- 975. DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281603.
- [34] What is a Fiber Bragg Grating? | FBG | Sensors | HBM. Test and Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage | HBM [online]. Copyright © HBM [cit. 05.04.2019]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>
- [35] KUNZLER, Marley, Robert EDGAR, Eric UDD, et al. Fiber grating traffic monitoring systems. In: Proc. SPIE 4696, 2002. DOI: 10.1117/12.472559.
- [36] SUOPAJAERVI, Pekka, Riku PENNALA, Mikko HEIKKINEN, et al. Fiber optic sensors for traffic monitoring applications. In: Proc. SPIE 3325, 1998. DOI: 10.1117/12.310611.
- [37] MALLA, Ramesh B., Amlan SEN a Norman W. GARRICK. A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways, Sensors, 2008. 8 (4). s. 2551-2568. DOI: 10.3390/s8042551.
- [38] WANG, Ying, Yan SUN, Jianping CHEN, Qifeng WU, Mudi XIONG, Sang Bae LEE, Ian H. WHITE a Rongxi HE. A new vehicle axle detector for roadways based on fiber optic MachZehnder interferometer. In: Proceedings of SPIE 6019, 2005. DOI: 10.1117/12.634102. ISBN 10.1117/12.634102
- [39] MELLER, Scott A., Noel ZABARONICK, I. GHOREISHIAN, J. ALLISON, Vivek ARYA, Marten J. DE VRIES, Richard O. CLAUS a Alan C. CHACHICH. Performance of fiber optic vehicle sensors for highway axle detection. in: Proc. of SPIE 2902, 1997. s. 168-174. DOI: 10.1117/12.267142.
- [40] DONLAGIC, Denis, Daniele INAUDI, Eric UDD a Marjan HANC. Vehicle axle detector for roadways based on fiber optic interferometer. In: Proceedings of SPIE 5050, 2003. s. 317-321. DOI: 10.1117/12.484261.
- [41] Nedoma, Jan & Fajkus, Marcel & Martinek, Radek & Vaňuš, Jan & Kepak, Stanislav & Kahankova, Radana & Jaros, Rene & Cvejn, Daniel & Prauzek, Michal. (2018). Analysis of the use of fiber-optic sensors in the road traffic. IFAC-PapersOnLine. 51. 420-425. 10.1016/j.ifacol.2018.07.117.
- [42] L. L. Feng et al., "Road Vehicle Information Collection System Based on Distributed Fiber Optics Sensor", Advanced Materials Research, Vols. 1030-1032, pp. 2105-2109, 2014
- [43] Nedoma, Jan & Fajkus, Marcel & Kahankova, Radana & Martinek, Radek & Dvorsky, Marek & Vaňuš, Jan & Vašínek, Vladimír & Cvejn, Daniel. (2018). Fiber-optic interferometric

- sensor for monitoring automobile and rail traffic. TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES. 26. 2987-2996. 10.3906/elk-1712-166.
- [44] Road traffic monitoring system. US20040067004 A1 Patent. Uděleno 8.4.2004.
- [45] Novel optical fiber vehicle detector. CN 200962255 Y Užitélný vzor. Uděleno 17.10.2007.
- [46] Optovláknový interferometrický senzor pro monitorování dopravního provozu. 2015-154 Patent. Uděleno 20.4.2016.
- [47] MARSHALL, John. A biographical dictionary of railway engineers. North Pomfret, Vt.: David, 1978. ISBN 978-071-5374-894.
- [48] ARTC - Extranet - Engineering [online]. Copyright © [cit. 12.04.2019]. Dostupné z: <https://extranet.artc.com.au/docs/eng/signal/procedures/maintenance/ESM-07-03.pdf>
- [49] Measurement of the train profile | SICK. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © 2019 SICK AG [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://www.sick.com/de/en/industries/traffic/rail/solutions-for-traffic-safety-at-railways/measurement-of-the-train-profile/c/p329737>
- [50] JWA, Y. a G. SONH. Kalman Filter Based Railway Tracking from Mobile Lidar Data. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015, II3/W5, s. 159-164. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-159-2015. ISSN 2194-9050.
- [51] LESLAR, Michael, Perry GORDON a Keith MCNEASE. Using mobile lidar to survey a railway line for asset inventory. In: ASPRS 2010 Annual Conference. San Diego, 2010.
- [52] ANDANI, Masood, Taheri a A. MOHAMMED a A. JAIN. Application of LIDAR technology for rail surface monitoring and quality indexing. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, DOI: 10.1177/0954409717727200
- [53]] SOKOLOWSKI, Kamil, Andrzej W. DOMANSKI, Tomasz R. WOLINSKI a Ryszard S. ROMANIUK. Intensity-based fiber optic bend sensor for potential railway application. In: Proc. of SPIE 5484. 2004, s. 417-420. DOI: 10.1117/12.568927.
- [54] iSES - Internet School Experimental System: Vzdálená laboratoř - Návod k experimentu. [online]. Copyright © 2019 [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/faraday/introduction>

- [55] Optické sítě / Couplery - výkonové děliče. Alternetivo | IT distributor | Switching/routing, monitoring, síťová bezpečnost, kabeláže, bezdrátové a optické sítě [online]. Copyright © 1996 [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: https://www.alternetivo.cz/opticke-site-couplery-vykonove-delice_c1742.html
- [56] 1*2 Single Mode Dual Window Fiber Optic Coupler Fc/apc - Buy 1*2 Single Mode Dual Window Fiber Optic Coupler Fc/apc Product on Alibaba.com. 302 Found [online]. Copyright © [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/1-2-Single-mode-Dual-window_60708068084.html
- [57] BS ISO 4866: 2010 Mechanické vibrace a rázy, vibrace pevných konstrukcí, směrnice pro měření vibrací a hodnocení jejich účinků na konstrukce, BSI Group 2010.
- [58] RP Photonics Encyclopedia - distributed feedback lasers, DFB laser. RP Photonics Consulting GmbH - technical consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software; encyclopedia and buyer's guide [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH [cit. 16.04.2019]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/distributed_feedback_lasers.html
- [59] CHOI, Sang-Jin, Young-Chon KIM, Minho SONG a Jae-Kyung PAN. A Self-Referencing Intensity-Based Fiber Optic Sensor with Multipoint Sensing Characteristics. *Sensors*. 2014, 14(7), s. 12803-12815. DOI: 10.3390/s140712803. ISSN 1424-8220.
- [60] Y Lee, K and K Lee, K and Ho, S.L.. (2004). Exploration of Using FBG Sensor for Axle Counter in Railway Engineering. 3.
- [61] Yüksel Kivilcim, Kinet Damien ,Moeyaert Véronique, Kouroussis Georges, Caucheteur Christophe. (2018). Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers. *Smart Materials and Structures*. 27. 105033. 10.1088/1361-665X/aadb62.
- [62] ROVERI, N., A. CARCATERRA a A. SESTIERI. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, 60-61, s. 14-28. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.003. ISSN 08883270.
- [63] FILOGRANO, M. L., P. CORREDERA GUILLEN, A. RODRIGUEZ-BARRIOS, S. MARTINLOPEZ, M. RODRIGUEZ-PLAZA, Alvaro ANDRES-ALGUACIL a M. GONZALEZHERRAEZ. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2012, 12(1), s. 85-92. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2135848. ISSN 1530-437x

- [64] ROVERI, Nicola, Antonio CARCATERRA a Aldo SESTIERI. Real time monitoring and wear estimation of railway track with FBG sensors. In: 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2014, s. 1-6. DOI: 10.1109/MESA.2014.6935619.
- [65] WEI, Chuliang, LAI, Chuncheung, LIU, Shunye, et al. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. IEEE Sensors Journal. 2010, vol. 10(12) s. 1905–1912. ISSN 1530437X. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2049199.
- [66] UDD, Eric. Fiber optic sensors for infrastructure applications. Oregon State Library [online]. 1998 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://www.oregon.gov/ODOT/Programs/ResearchDocuments/FiberOpticSensors.pdf>
- [67] CRAIN, Stephanie, REICHEL, D., et al. Strain monitoring of a newly developed precast concrete track for high speed railway traffic using embedded fiber-optic sensors. In: Proc. of SPIE 4694, 2002, 4694, s. 259–264. ISSN 0277786X. DOI: 10.1117/12.472627.
- [68] SIEMENS AG. Rail contacting device in railway systems, particularly for axle counting devices. Patent, DE3537588 A1. Uděleno: 23.4.1987.